ENDEAVOUR

Revista trimestral, publicada en cinco idiomas, destinada a registrar el progreso de las ciencias al servicio de la humanidad

---

VOLUMEN XX Julio 1961 NUMERO 79

SUMARIO

5.001.891:070.432
Editorial: Sobre el costo de las investigaciones 119

530.12:531.5
Las ondas gravitatorias — H. BONDI — 121

551.593.51
El destello verde y fenómenos afines — D. J. K. O'CONNELL — 131

541.653
Dispersión rotatoria óptica — CARL DJERASSI — 138

576.312:577.15
El nucleolo del núcleo celular — J. L. SIRLIN — 146

668.81:547.458.8
Colorantes reactivos para la celulosa — I. D. RATTEE — 154

623.454.7(091):93
El fuego griego — J. R. PARTINGTON — 162

049.3
Revista de libros 166

Revistas resumidas de libros 171

Notas sobre los colaboradores 172

Libros recibidos .. ..Cubierta III

Redactor-jefe: TREVOR I. WILLIAMS
Redactores auxiliares: G. N. J. BECK (*Ediciones extranjeras*)
W. A. OSMAN

Imperial Chemical Industries Limited, Millbank, Londres, S.W.1
Toda comunicación a los editores debe dirigirse a North Block, Thames House, Millbank, Londres, S.W.1

Sobre el costo de las investigaciones

Desde hace mucho tiempo se viene considerando que la pura búsqueda del conocimiento es una de las más nobles actividades humanas, proposición que muy pocos hombres de ciencia desearán contradecir. Es más, podría afirmarse que el «instinto científico» y el interés público van de la mano: no sería difícil señalar sinnúmero de descubrimientos que, al parecer inútiles en el momento de ser realizados, demostraron luego tener grandísima importancia práctica. El pasado nos enseña que, a la larga, las inversiones en la investigación científica producen útiles beneficios, aun cuando el carácter y magnitud de éstos sean de difícil predicción. Tal argumento es, sin duda, fácil, y no pocos dirían que con él se podría justificar no importa qué clase de investigación. Sin embargo, las sumas globales que hoy se invierten en la investigación son tan enormes que, al repartir tales fondos, es lógico preocuparse, cada día más, por el carácter tanto cuantitativo como cualitativo de este problema. Es imposible establecer un cálculo exacto de tales gastos, debido a la dificultad de definir con precisión lo que sea la investigación y de poder controlar ésta en sus últimas ramificaciones. Existen, con todo, cálculos aproximados; uno recientemente establecido por el *Advisory Council on Scientific Policy* de la Gran Bretaña muestra que en ese país las sumas invertidas para la investigación alcanzaron en 1959 un total de 478 000 000 de libras esterlinas, o sea el 2,35% de la renta nacional bruta. De tal suma, más de la mitad correspondía a las investigaciones y estudios llevados a cabo por la industria privada; casi exactamente un tercio fueron gastos estatales destinados a las investigaciones de carácter militar; la investigación universitaria recibió menos del 5% de la suma total. Aunque la cantidad total invertida en los Estados Unidos representa una suma mucho mayor (£3 971 000 000), el porcentaje de la renta nacional bruta viene a ser el mismo (2,74%). No es factible establecer comparaciones precisas con otros países, pero tenemos muy buenas razones para suponer que en la Unión Soviética el presupuesto de investigación es tan alto — si no más — y que la mayoría de las grandes naciones destinan asimismo sumas muy elevadas para tales fines. Sin embargo, todo el mundo reconoce que deben incrementarse dichos gastos si se quiere hacer uso adecuado de las posibilidades que ofrece la ciencia.

Las actuales inversiones que en escala mundial se realizan para la investigación científica son enormes tanto en su valor absoluto como si las comparamos con las de los años anteriores a la primera guerra mundial, época en la que se formularon muchas de las nociones políticoeconómicas todavía vigentes. En aquella época, la actividad científica era algo mucho más remoto de la vida cotidiana que lo es hoy día, y el investigador científico sólo tenía que justificarse, cuando ello se consideraba necesario, ante quienes lo subvencionaban. Hoy la situación es muy distinta: gran parte de los fondos proceden directa o indirectamente del Estado. Por lo tanto es esencial, para que continúe y aun aumente este apoyo, abogar convincentemente ante la sección influyente de la opinión pública y demostrar que tales inversiones son productivas. Con razón o sin ella, productividad, en este caso, significa «aplicación práctica» de los resultados de la investigación, ya sea al mejoramiento del nivel de vida, de la higiene y salud públicas, de la defensa o del prestigio nacionales, etc. Parte importante de la investigación científica se subvenciona hoy gracias a la riqueza que crea la aplicación de sus resultados, ya que la suma total necesaria ha alcanzado tal magnitud que sería imposible su inversión sin tener en cuenta los resultados prácticos. Esa es la situación real, por poco agradable que parezca a quienes piensen que sólo los científicos deben ser árbitros en las cuestiones relacionadas con la ciencia.

Naturalmente, esto no significa que deban incrementarse las investigaciones relativas a la ciencia aplicada a expensas de la ciencia pura; aparte del deseo que podamos tener de aumentar la esfera de nuestros conocimientos, tal actitud sería, a la larga, ruinosa. Pero sí quiere decir que, como medida de prudencia, será necesario considerar más detenidamente el adecuado equilibrio entre ambos campos de investigación. Es evidente que tal punto de equilibrio existe: hay ciertas investigaciones que, a lo que podemos alcanzar, no entrañan aplicación práctica alguna de sus resultados. En una sociedad bien organizada tales estudios merecen recibir apoyo por las mismas razones que lo reciben las artes: porque forman parte de todo un caudal cultural. En el otro extremo de la escala, es evidente que aun el materialista más desaforado tiene que reconocer que la aplicación práctica de los conocimientos científicos terminará por agotarse si no ampliamos

continuamente ese fondo de conocimientos. Pero como la bolsa de donde proceden los dineros no es inagotable, es evidente que los diferentes tipos de investigación recibirán sólo limitado apoyo. ¿Cómo establecer el necesario equilibrio?

No hay una respuesta precisa. Aparte de otras consideraciones, hay grandes diferencias entre las distintas ramas científicas. En algunas, la falta de conocimientos fundamentales retrasa su progreso; en otras, esos conocimientos fundamentales se acumulan a tal velocidad que no pueden ponerse en aplicación práctica: es como un capital que no devenga intereses. Hoy, las diferentes ramas de la ciencia ejercen entre sí una influencia fertilizadora, y, por lo tanto, parecería lógico incrementar las subvenciones en aquéllas más débiles para conseguir así un progreso general sobre un amplio frente. Pero aunque esto fuera posible, sólo podría realizarse por medio de una campaña a largo plazo, dado que la concesión de medios económicos es únicamente el primer paso de un largo proceso. A continuación hay que construir laboratorios, instalar instrumental y equipo y preparar los científicos que sepan utilizarlo. En la ciencia, como en otras actividades, los alicientes económicos tienen mucho peso, y deberá estimularse el reclutamiento de investigadores en aquellas ramas donde sean en especial necesarios. Pero tampoco es ésa la solución completa: en la ciencia, como en tantas otras esferas de actividad cooperadora, lo que produce resultados es la entusiasta labor de maestros y guías, y éstos, por desgracia, no abundan.

Pero ni los guías ni los seguidores se crean solos; por eso, la enseñanza científica, de la que han de surgir los investigadores futuros, tiene máxima importancia. A la larga, este aspecto puede muy bien decirse que forma parte del costo de la investigación, aunque muy pocas veces se tiene en cuenta; con todo, lo indudable es que gran parte del valor de un científico depende mucho de los primeros años de formación. En la actualidad, casi todos los países del mundo realizan considerables esfuerzos e incurren en no menores gastos para multiplicar el número de estudiantes universitarios de ciencias; sin embargo, de una manera ilógica, apenas se presta atención a la adecuada enseñanza escolar, que cubre los años verdaderamente formativos, durante los que se pueden inculcar firmemente los principios del método científico. En pocos países se ha procurado recompensar merecidamente a los maestros que se ocupan de formar los científicos del futuro, recompensa que debe ser adecuada respecto a la que reciben los propios científicos. También en esto se observa un desequilibrio, aunque es más fácil señalar la falta que sugerir un remedio.

Ya hemos mencionado la necesidad de alcanzar un justo equilibrio entre la investigación científica pura y los estudios de sus aplicaciones, problema éste de máxima importancia para el desarrollo de la ciencia. Es difícil desarraigar la creencia de que, de cierta manera, la primera tiene una dignidad intelectual superior a los segundos; durante sus estudios universitarios los estudiantes tienden a formar la opinión de que la única aspiración encomiable es dedicarse a la investigación pura, dado que la industria es el refugio de los de segunda fila. Aunque tal creencia se halle hoy limitada a una minoría, basta para aumentar las dificultades que existen para encaminar los mejores cerebros hacia la investigación de aplicaciones. Tal situación sería justificable si las premisas sobre las que se apoya fuesen acertadas, ya que nada parecería más absurdo que usar los mejores cerebros a menos de su plena capacidad. Pero todas las pruebas apuntan a lo contrario; los que se han dedicado a ambos tipos de investigación aseguran que la industria puede ofrecer a la gran mayoría de científicos problemas de tanto interés intelectual como los que puedan encontrar en un laboratorio universitario. Esto no quiere decir, naturalmente, que la investigación con fines industriales sea siempre una aventura intelectual interesante; pero lo mismo puede afirmarse de la investigación pura. La obtención de datos esenciales puede muy bien ser pedestre y repetitiva; lo que puede animar tales trabajos es la concepción de métodos para la obtención de nuevos conocimientos y la interpretación de observaciones: ahí es donde una mente original puede dar la medida de su valía. Al considerar la cuestión general del costo de las investigaciones es necesario tener en cuenta no sólo la repartición entre las puras y las aplicadas, sino también las medidas necesarias para un reparto justo de los mejores investigadores entre ambos tipos de actividad. Hasta que no se haya conseguido tal equilibrio será difícil decir que se aprovechan al máximo las aplicaciones posibles de los nuevos descubrimientos. Es más, si no vencemos los actuales prejuicios, los defensores a ultranza de la investigación pura serán los primeros en sufrir las consecuencias, ya que es innegable que las riquezas que crea la ciencia aplicada contribuyen considerablemente al sostenimiento de la ciencia pura. A la larga, el destino de ambos aspectos de la actividad científica se encuentra íntimamente entrelazado.

Las ondas gravitatorias

H. BONDI

El estudio experimental de las ondas gravitatorias plantea grandes problemas, principalmente a causa de la gran debilidad de los campos gravitatorios. Las ondas son apreciables sólo en el caso de cuerpos de gran masa que se mueven con grandes aceleraciones. Aunque por ahora no exista la posibilidad de observar ondas gravitatorias pueden inferirse algunas de sus propiedades. Este artículo muestra cómo la teoría gravitatoria está relacionada con el resto de la física y reseña algunas direcciones de las investigaciones desarrolladas en años recientes.

Las ondas gravitatorias no sólo son un concepto poco tratado y aún término poco en uso, sino que además es muy improbable que puedan ser observadas. A pesar de esto, su estudio ha recibido bastante atención y es altamente instructivo ya que está ligado a no pocas ramas de la ciencia. Se trata de un tema situado entre la macrofísica y la teoría cuántica, entre la teoría gravitatoria y la teoría de las ondas electromagnéticas y similares, entre la matemática pura y la física. Las investigaciones actuales tratan de los campos gravitatorios de cuerpos que se mueven rápidamente. La gravitación es una fuerza despreciable a no ser que el cuerpo que la ejerce tenga gran masa, y en tales cuerpos las grandes aceleraciones son virtualmente desconocidas. De aquí que no se pueda tratar esta materia experimentalmente. Hay que limitarse por necesidad a investigaciones matemáticas basadas en la mejor teoría existente sobre la gravitación: la teoría general de la gravitación, de Einstein. Muchas de las dificultades encontradas se deben a la complejidad matemática de tal teoría. Para explicar por qué se tiene la suficiente confianza en esa teoría y justificar así los esfuerzos que se han dedicado al estudio de las ondas gravitatorias, es necesario referirse a temas fundamentales de física y considerar el carácter básico de la teoría.

LA DINAMICA NEWTONIANA

Aunque es bien sabido que las tres leyes de Newton colocaron la dinámica sobre una base firme y permitieron un período de rápido crecimiento, no siempre se ha reconocido claramente la importancia de la aportación de Newton. Se recordará que éste relacionó la fuerza con la aceleración, mientras que hasta entonces se creía que estaba relacionada con la velocidad. ¿Por qué era tan importante esta nueva definición de fuerza en la que la aceleración sustituye a la velocidad? La respuesta es clara cuando se considera el movimiento de la Tierra. Si se busca la fuerza que causa este movimiento y se supone que está relacionada con la velocidad, como se creía en la época anterior a Newton, se deberá mirar en la dirección de la velocidad de la Tierra para encontrar algo que causara su movimiento. Pero al mirar en esa dirección unas veces se ve una estrella insignificante, otras veces otra estrella, y a veces prácticamente nada. Si, al contrario, se mira en la dirección de la aceleración de la Tierra, se ve el Sol y es muy natural considerar este cuerpo tan importante como la causa, en cierto modo, de la órbita de la Tierra. En otras palabras, la definición de fuerza dada por Newton nos capacita para relacionar un observable cinético — la aceleración de la Tierra — con algo que puede observarse ópticamente — la dirección del Sol. Una de las características de cualquier hipótesis científica acertada es que relaciona dos tipos de observación que antes se consideraban independientes, y así es en este caso; de ahí que la dinámica de Newton fuera tan fecunda. Podemos señalar además algo que encontraremos varias veces en este artículo: la unidad esencial de la física. La física no se puede subdividir en compartimentos estancos, tales como la dinámica, la óptica, el calor, etc., sino que todas esas ramas están ligadas entre sí en formas variadas, y muchas de las intuiciones físicas más importantes serían estériles si no se tuviesen en cuenta tales relaciones. No podemos tener un tipo de física para estudiar las fuerzas y otro tipo de física para otros fenómenos; nunca se hubiera podido establecer la dinámica sin observaciones ópticas, ni existe tal cosa como un experimento puramente dinámico.

El punto siguiente al que hemos de prestar atención es la naturaleza del sistema de referencia con respecto al cual se mide la aceleración. En la dinámica newtoniana se considera la fuerza como algo esencialmente real, algo de verdadero

significado físico. La segunda ley de Newton presupone por tanto que la aceleración es también real. Pero la aceleración es el cambio de velocidad por unidad de tiempo, y velocidad es el cambio de posición por unidad de tiempo, y posición, velocidad y aceleración son relativas en una forma o en otra. El estado de movimiento del sistema de referencia decide los valores que se obtienen para cada una de esas variables. Así, si la aceleración es algo físicamente real, algo que puede ser identificado con una verdadera variable física, como la fuerza, entonces sólo son admisibles para nuestras observaciones aquellos sistemas de referencia que dan el valor correcto de la aceleración. Si tenemos tal sistema de referencia y tomamos un segundo sistema de referencia en movimiento no acelerado relativo respecto a aquél — es decir, moviéndose con velocidad constante en una dirección fija — entonces las velocidades medidas en el segundo sistema serán diferentes de las velocidades medidas en el primer sistema, pero las aceleraciones serán iguales en ambos. El segundo sistema será pues tan admisible como el primero como sistema de referencia. Así pues, en la dinámica newtoniana no tenemos un sistema único de referencia, no tenemos una especie de patrón de reposo absoluto para todo el Universo, sino que tenemos una familia completa de tales sistemas de referencia, y cualquier par de ellos están en movimiento relativo no acelerado. Un sistema tal de referencia se llama un sistema inercial, y la aceleración, tal como se observa desde un sistema inercial, está relacionada con la fuerza por medio de la segunda ley de Newton. Existe pues una distinción muy clara en la dinámica newtoniana entre los dos tipos de sistemas de referencia: inerciales y no inerciales; sólo las fuerzas medidas en sistemas inerciales pueden considerarse reales. Si trabajamos en un sistema acelerado de referencia, es decir en un sistema no inercial, entonces surgen fuerzas ficticias. La más conocida de éstas es la fuerza centrífuga, que surge cuando trabajamos en sistemas giratorios de coordenadas; hay además otras de tal naturaleza.

Puesto que encontramos que una fuerza determinada es siempre la misma si se la mide en un sistema inercial cualquiera, se deduce que todos los sistemas inerciales son completamente equivalentes entre sí. Podemos pues establecer el principio de relatividad newtoniana como sigue:

1. Existe una distinción clara entre sistemas inerciales y sistemas no inerciales.
2. Dos sistemas inerciales cualesquiera están en movimiento relativo no acelerado.
3. Dos sistemas inerciales cualesquiera son completamente equivalentes dinámicamente y es imposible diferenciarlos mediante experimentos internos.

El significado de este último principio es simplemente que si vamos a bordo de un avión que se mueve uniformemente y llevamos a cabo experimentos dentro de ese avión, entonces todos esos experimentos darán precisamente el mismo resultado que darían en una habitación en la Tierra. Como no hay efectos físicos de velocidad, sino sólo efectos de aceleración, se sigue que no se puede encontrar la velocidad de un objeto mediante experimentos internos. La velocidad no es absoluta, sino puramente relativa, mientras que la aceleración es absoluta.

ELECTROMAGNETISMO Y RELATIVIDAD ESPECIAL

En la dinámica newtoniana nunca se considera la velocidad como algo fundamental: es, en cierto modo, arbitraria. En un campo de fuerzas podemos empezar en cualquier momento, dando posiciones y velocidades arbitrarias a todas las partículas. Les leyes de la dinámica especifican entonces su comportamiento posterior. Sin embargo, en otras ramas de la física, y, especialmente en el electromagnetismo y en la rama con él relacionada de la óptica, existe una velocidad de importancia fundamental: la velocidad de la luz. No sólo es ésta la velocidad en el vacío de todas las numerosas clases de ondas electromagnéticas, sino que esta velocidad aparece también en las ecuaciones fundamentales de la inducción electromagnética. Si se aplica la idea básica de los principios de la relatividad newtoniana, establecidos en la sección anterior, se sigue que esta característica fundamental, la velocidad de la luz, debería ser independiente del sistema inercial desde el que se la observa. La afirmación de que esto es así, y por tanto la reafirmación de los principios newtonianos de la relatividad para el electromagnetismo, son conocidas como la teoría de la relatividad especial. Tan a menudo se indica el carácter revolucionario de esa teoría que frecuentemente se pasa por alto que su reafirmación de que las ideas newtonianas son tan aplicables al electromagnetismo como a la dinámica es simplemente la afirmación de la validez de la relatividad newtoniana para toda la física. Así pues, esta teoría es, en cierto modo, profundamente conservadora; los principios que se encontró que eran aplicables para la dinámica se afirma que son válidos para todo el campo de la

física. La teoría de la relatividad especial es una consecuencia necesaria de la afirmación de que la unidad de la física es esencial, pues sería intolerable que todos los sistemas inerciales fuesen equivalentes desde un punto de vista dinámico, pero que fuese posible distinguirlos por medidas ópticas. Parece ahora increíble que la posibilidad de tal distinción fuese aceptada en el siglo XIX pero, desde luego, en aquella época no era fácil ver cuál era más importante: la validez universal del principio newtoniano de la relatividad o la naturaleza absoluta del tiempo mencionada en la sección anterior.

Un sencillo razonamiento matemático muestra que la velocidad de la luz no puede ser la misma en todos los sistemas inerciales de referencia si se mantiene la hipótesis de un tiempo universal. Hay pues que abandonar la idea metafísica de que el tiempo es algo absoluto, y considerarlo en el sentido físico propio como algo que es medido por un reloj. En la ciencia moderna, se entiende cada vez mejor que es inútil hablar de magnitudes, a no ser que se diga cómo van a ser medidas. No es científico considerar el tiempo uniforme y continuo como algo inalterable por cierta razón misteriosa. Tampoco podemos suponer que, en cierto sentido mal definido, el tiempo medido por un reloj en un sistema de referencia es igual al tiempo medido en otro sistema. Lo que sí podemos afirmar al admitir el principio newtoniano de la relatividad (que cuando se aplica a toda la física se llama principio de la relatividad especial de Einstein) es la equivalencia de todos los sistemas inerciales. Han de establecerse nuevas reglas de transformación, y su cualidad esencial es que el tiempo está ligado con el espacio. Generalmente esto se define como «la naturaleza tetradimensional del espacio-tiempo». Aunque a veces esta frase suena misteriosa, la idea básica es perfectamente clara. Lo que queremos decir al hablar de la «naturaleza tridimensional del espacio» es que se necesitan tres medidas diferentes para especificar la extensión de un cuerpo, pero que esas dimensiones pueden intercambiarse mediante una rotación del cuerpo. No son una cosa absoluta en ningún sentido de la palabra, aunque podamos deducir de ellas magnitudes (como la distancia entre dos puntos) dentro del cuerpo independientemente del punto de vista adoptado. Lo que se quiere decir por «naturaleza tetradimensional del espacio-tiempo» es que la velocidad del observador puede producir un intercambio similar del intervalo tiempo con la la extensión-espacio. Lo fundamental es que este efecto es muy similar al de la rotación sobre las tres coordenadas espaciales, y que, de la misma manera que la distancia entre dos puntos del cuerpo es independiente del sistema, así también otros tipos de medidas, llamadas intervalo, son independientes del estado de movimiento del observador.

Será ventajoso considerar el poder algebraico de la teoría de la relatividad, que surge directamente de la naturaleza tetradimensional del espacio-tiempo. Hay muy pocas estructuras algebraicas simples que puedan encajarse en el espacio-tiempo, lo que nos permite hacer deducciones muy importantes. En el espacio tridimensional ordinario reconocemos que la posibilidad de un cambio de posición del observador reduce el número de leyes físicas concebibles. Es posible decir que la fuerza sobre una partícula cargada móvil debida a un campo magnético es perpendicular a la velocidad de la partícula y a la dirección del campo magnético. Pero no es posible decir que la fuerza ocurre siempre en una dirección hacia la derecha de la partícula pues ello significaría cosas diferentes para observadores distintos.

Imaginémonos ahora una fase en el progreso de la ciencia en que se conociesen bien las leyes de la propagación de la luz, lo que permitiría establecer la teoría de la relatividad especial, pero cuando apenas se conociesen las leyes del electromagnetismo y no se entendiese en absoluto la naturaleza electromagnética de la luz. Supóngase, en concreto, que se desconociese completamente el magnetismo y que sólo se hubiesen descubierto dos leyes sencillas de la electrostática: primera, que las líneas de fuerza eléctrica se originan sólo en cargas eléctricas y que esto es cierto lo mismo para cargas móviles que para cargas en reposo; segunda, que el campo eléctrico es conservativo (lo que quiere decir que si se mueve una carga a lo largo de un circuito cerrado el trabajo total que puede obtenerse del campo eléctrico es nulo), pero sólo si el campo es constante en el tiempo. ¿Cómo aparecería esta situación desde un punto de vista relativista? En la relatividad tenemos un espacio de cuatro dimensiones y por lo tanto toda magnitud dirigida (vector) ha de tener cuatro componentes que pueden, hasta cierto punto, transformarse entre sí, si se cambia la velocidad del observador. Así, en dinámica, las cantidades de movimiento son las tres coordenadas espaciales y la energía es la cuarta coordenada, la componente temporal. Al aplicar la teoría relativista se encuentra corrientemente que la componente temporal está asociada con las tres componentes

espaciales de un vector. Sin embargo, la ley acerca del origen de las líneas eléctricas de fuerza en las cargas no es de ese tipo. No sólo depende de las tres coordenadas espaciales del campo eléctrico, sino que su validez, incluso cuando las cargas están en movimiento, niega explicitamente la existencia de una componente temporal. Se sigue pues de aquí que el campo eléctrico no puede tener una estructura algebraica tan simple como la obtenida de la cantidad de movimiento y energía de una partícula. Ha de examinarse pues algo más complicado, y la cosa que sigue en complicación a un vector es un tensor.

Un tensor es un ente que tiene, en cuatro dimensiones, dieciseis componentes; el número de esas componentes puede, sin embargo, reducirse mediante consideraciones de simetría. En una forma especialmente simple de simetría (la antisimetría) el número de componentes se reduce a seis, tres de las cuales forman un grupo y las otras tres otro grupo; cada grupo se transforma en el otro mediante un movimiento. Las tres componentes del primer grupo pueden fácilmente identificarse con las tres componentes espaciales del campo eléctrico y no pueden, hablando matemáticamente, tener una componente temporal asociada con ellas. Las tres componentes importantes de un tensor antisimétrico son el único grupo que aparece de un modo natural y que posee esta propiedad. Asociadas con ellas están las otras tres componentes y, como éstas aparecen sólo cuando existe una velocidad, desde el punto de vista relativista se puede deducir que lo mismo que las cargas eléctricas en reposo producen un campo eléctrico, las cargas eléctricas en movimiento (una corriente eléctrica) deberían producir otro tipo de campo. Este es lo que se llama «campo magnético», y en la teoría relativista se deduce su existencia a partir de consideraciones sencillas de simetría. Aún más, el hecho de que el campo eléctrico en su condición estática era conservativo, nos ayuda a avanzar un paso más en la identificación de la estructura del campo electromagnético, pues podemos deducir que se puede derivar todo el campo de un potencial vector en cuatro dimensiones. Si después asociamos este campo, cuya entera complejidad podría haberse deducido de consideraciones relativistas, con las fuentes del campo (las cargas en reposo o en movimiento) se puede llegar al conjunto completo de las ecuaciones de Maxwell, que describen el campo electromagnético. A partir de estas ecuaciones se puede después deducir que los cambios en el campo electromagnético serían radiados y se propagarían con la velocidad de la luz. Para completar este conjunto de ecuaciones hay que hacer una hipótesis acerca de la causalidad, es decir que la información sobre un cambio en un sistema se propaga hacia el futuro y no hacia el pasado. Ya no es difícil identificar la luz como una forma de esas perturbaciones electromagnéticas, cuyas propiedades de propagación han sido deducidas completamente a partir de la relatividad, así como las reglas más elementales del campo electrostático.

Puede ser útil discutir en este punto brevemente lo que en matemáticas se entiende por ondas. No significa necesariamente un fenómeno periódico sinusoidal; es más bien algo que se propaga. Así una de sus características esenciales es su capacidad de transmitir información. Mediante una onda el receptor obtiene información acerca de lo que sucede en el transmisor. Los cambios en el estado del trasmisor se propagan en forma de ondas; la idea de información está entrelazada íntimamente con la idea de ondas y es esencial para su comprensión.

Una segunda característica de las ondas es la transmisión de energía. Hay muchas formas de transmisión de energía, y puede ser útil si pensamos primero en la forma en que se transmite la energía desde una central eléctrica al consumidor a lo largo de los cables de suministro. Lo importante aquí es que la energía suministrada por la central eléctrica viene determinada (aparte de pérdidas en la transmisión que son pequeñas y pueden en principio ser despreciadas) completamente por lo que el consumidor utiliza. Sin embargo, en la propagación de ondas la situación es completamente diferente. Un transmisor de radio emite energía en el espacio y la potencia suministrada es independiente del número y situación de los receptores. La cantidad de energía radiada es independiente de si la gente sintoniza o no sus receptores. Es ésta una propiedad extraña de la radiación que es difícil de entender en muchos aspectos, pues ¿a dónde va la energía radiada? Parece que la absorbe el espacio a grandes distancias. Hay buenas razones para suponer que el sistema sólo funciona porque toda la radiación es al final absorbida, aunque a distancias muy grandes, y que esto está relacionado muy íntimamente con la construcción de nuestro universo, que está en expansión. Desde nuestro punto de vista puede por tanto decirse que las dos características esenciales de las ondas son: que la energía es independiente de la existencia y locación de receptores, y que las ondas transmiten nueva información.

LA GRAVITACION

La gravitación se distingue de todas las demás fuerzas por el hecho, descubierto por Galileo, de que todos los cuerpos caen con la misma velocidad. En otras palabras, la fuerza de la gravitación es proporcional a la masa del cuerpo, de tal forma que la aceleración de un cuerpo es independiente de su masa. Un poco más adelante estudiaremos el significado completo de este fenómeno notable; pero cuando Newton formuló su teoría de la gravitación simplemente consideró como axiomático que la atracción gravitatoria sobre cualquier cuerpo es proporcional a su masa.

Aún más, Newton se apoya en la ley de que una fuerza depende del cuadrado inverso de la distancia y consideró que la gravitación era una fuerza conservativa. Finalmente presumió también que es la masa lo que da a la materia — fuente del campo gravitatorio — la propiedad de causar los efectos gravitatorios, resultado que, en todo caso, es consecuencia de su tercera ley referente a la acción y reacción. El sistema solar ha ofrecido amplias posibilidades para contrastar la teoría de la gravitación de Newton durante largos períodos de tiempo y en sus más minuciosos detalles.

Hace sesenta años se hubiera podido decir que la teoría de la gravitación de Newton era la mejor establecida y la más sólida de la física. Entonces, repentinamente, apareció una nueva teoría de la gravitación: la de la relatividad general de Einstein; la creencia en la validez absoluta de la teoría de Newton fue abandonada fácilmente. ¿Cómo pudo ocurrir que se abandonase una teoría tan bien establecida y se la sustituyese por otra, cuyo mérito principal es que da los mismos resultados que la teoría de Newton? Las poquísimas y poco importantes diferencias no están establecidas observacionalmente de un modo muy firme; sin embargo, la base conceptual de la teoría de Newton se considera completamente insostenible siendo la relatividad general la teoría sobre la que se basan todos los trabajos actuales.

Hay dos razones para este eclipse de las concepciones newtonianas: la primera es, simplemente, la relatividad especial. Ya mostramos en la sección anterior que las nociones básicas de la óptica y de la teoría electromagnética exigen que abandonemos la idea newtoniana de un tiempo uniforme y continuo y de un espacio tridimensional y la sustituyamos por un espacio-tiempo tetradimensional. La gravitación newtoniana no se puede adaptar a este espacio-tiempo tetradimensional: no posee la estructura algebraica adecuada. Si no se notó esto antes fue debido simplemente a la circunstancia de que todo nuestro conocimiento de la gravitación proviene de cuerpos que se mueven lentamente y para tales cuerpos no existe apenas diferencia entre el espacio y tiempo newtonianos y el espacio-tiempo de la relatividad especial. Sin embargo, la aceptación completa de la relatividad especial implica que no se puede encajar la teoría newtoniana en el marco de la física moderna y que por tanto ha de ser abandonada y sustituída por otra teoría. La elección es muy limitada, ya que el número de teorías relativistas simples es pequeño, y surge aquí la primera sospecha de la existencia de ondas gravitatorias. Ya hemos visto que las simples leyes de la electrostática, incluyendo la ley de la inversa del cuadrado, nos llevan, casi ineluctablemente y dentro del marco del espacio-tiempo de la relatividad especial, a la noción de ondas electromagnéticas. Tan pronto como decidamos que la teoría gravitatoria ha de ser también relativista, sospechamos que ha de tener lugar aquí también un desarrollo análogo; es decir que mientras que los campos gravitatorios estáticos están bien descritos por la ley de la inversa del cuadrado, los campos gravitatorios de los cuerpos en rápido movimiento han de originar ondas gravitatorias.

La segunda razón para rechazar la teoría newtoniana — el principio de Galileo — sirve también para determinar cuál de las varias teorías relativistas posibles de la gravitación debe aceptarse. En la teoría newtoniana, el hecho de que la fuerza gravitatoria es proporcional a la masa del cuerpo sobre el que actúa no se considera más significativo que decir, por ejemplo, que las fuerzas electrostáticas deberían ser proporcionales a la carga del cuerpo sobre el que actúan. Sin embargo, esta apreciación de la relación entre la masa y la fuerza gravitatoria es poco profunda. Los cuerpos pueden tener cualquier carga eléctrica que nosotros queramos, pero la masa de un cuerpo es inalienable. No existe un cuerpo sin masa, aunque hay muchísimos cuerpos sin carga. Esto afecta muy directamente la base de la dinámica newtoniana, la primera ley de Newton, que establece que un cuerpo sobre el que no actúe ninguna fuerza se mueve en línea recta con velocidad constante. Pero ¿qué posibilidades hay de comprobar esa ley? Supongamos que quisieramos experimentarla mediante la observación de la moción de un cuerpo apropiado. Para comprobar la primera ley hemos de hacer desaparecer todas las fuerzas que actuan sobre él. En primer lugar,

el físico realiza una inspección para asegurarse de que no hay cuerdas que tiren del cuerpo, después se cerciora de que no existe fricción entre él y sus alrededores. Después se asegura de que no tiene carga eléctrica, de manera que no sufra atracción por campos eléctricos, etc. De esta forma puede hacer desaparecer todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, o, más bien, todas las fuerzas menos una: la gravitación. No se puede descargar el cuerpo de su masa, pues ésta no se puede separar de él más que un hombre de su propia sombra.

Newton creyó que se podía superar tal dificultad especificando que al realizar el experimento con dicho cuerpo, éste debe hallarse suficientemente alejado de otros cuerpos. Pero esto no resuelve el problema: por un lado, el movimiento «patrón» (que es lo que prescribe la primera ley) debe poder producirse en todos los puntos; por otro, el Universo — como hoy sabemos muy bien — está poblado de materia en todas partes. Hemos, pues, de concluir que el «patrón» de Newton (movimiento rectilíneo y uniforme no influido por una fuerza) es inalcanzable. La idea fundamental que en realidad quería expresarse con tal «patrón» es que si un cuerpo presentaba tal movimiento uniforme y rectilíneo no era necesario buscar una fuerza que lo causase. Sólo cuando el cuerpo se apartaba de tal movimiento «patrón» había que buscar la fuerza causante. Sin embargo, tal tipo de argumento es inválido si no se puede disponer de tal movimiento «patrón» en forma comprobable. La única solución es tomar como movimiento «patrón» de la materia su moción bajo la influencia de la fuerza de la gravitación: en otras palabras, abandonar la idea toda de la gravitación como fuerza. Una fuerza es algo que altera el movimiento «patrón» de la materia, si por éste entendemos, como hemos dicho, el movimiento normal de la materia bajo la gravitación y la inercia. En cierto modo, la gravitación y la inercia son ahora una sola cosa; son como los raíles sobre los que se mueve la materia cuando no hay fuerzas presentes. Naturalmente, para incluir todos los complicados fenómenos de la gravitación, el nuevo movimiento «patrón» debe ser infinitamente más complejo que la «moción uniforme y rectilínea» del modelo newtoniano. A pesar de ello, hemos alcanzado ahora una posición mucho más satisfactoria en la que se da la debida importancia al hecho de que la gravitación hace que todos los cuerpos se muevan a la misma velocidad.

¿Qué queda del campo gravitatorio cuando lo consideramos como «patrón»? La única propiedad que nos puede servir ahora es su inhomogeneidad: esto es, el hecho de que las partículas próximas no caen precisamente de idéntica manera, ya el campo gravitatorio varía de punto a otro. Un estudio de la aceleración relativa de partículas próximas nos sirve ahora para describir el campo gravitatorio, lo que puede hacerse fácilmente de manera relativista. Aún más, de esta forma hemos fijado la forma de la teoría relativista de la gravitación: ha de ser tal que la gravitación reproduzca los efectos que es capaz de producir la inercia, pues inercia y gravitación son ahora una sola cosa. Se recordará que en la teoría newtoniana, cuando se utilizaba un sistema de referencia no inercial, aparecían fuerzas ficticias, como la fuerza centrífuga. Se sigue pues que la descripción del campo gravitatorio ha de corresponder a la complejidad de movimientos que pueden producirse utilizando sistemas arbitrarios de referencia y considerando las fuerzas inerciales ficticias que entonces aparecen. Sobre esa base resulta que la gravitación queda descrita por un tensor simétrico en el espacio-tiempo que es un ente con diez componentes independientes. Este tensor tiene en efecto el significado especial de que describe la naturaleza del espacio-tiempo mismo. El espacio se mide naturalmente utilizando partículas móviles libres y rayos de luz, que son una forma límite de las partículas en libre movimiento. Por tanto, el nuevo movimiento «patrón» sirve para describir el espacio-tiempo mismo. No se lo mide en función de líneas rectas descritas con velocidad constante, sino en términos del movimiento libre de la materia.

Esta es, pues, la base de la llamada teoría de la relatividad general de Einstein, que puede verse cuán inmensamente convincente es. Su base es que todos los cuerpos caen con la misma velocidad y que el hecho de hallarse sometida a la gravitación es una propiedad ineludible de la materia. Desde el principio se halla concebida dentro del espacio-tiempo y por tanto está conforme con las nociones del electromagnetismo y la relatividad especial; es pues, la sucesora natural de la teoría de Newton. En esta última, la ecuación que determina la forma en la que la materia produce el campo gravitatorio consiste en una combinación lineal de aceleraciones relativas de partículas próximas entre sí cuya laplaciana se hace equivalente a la densidad de la materia. Un procedimiento semejante en la relatividad general lleva a las llamadas ecuaciones de campo, que de nuevo usan combinaciones lineales de los coeficientes que determinan las aceleraciones relativas de partículas próximas que se equiparan al contenido

material del espacio. Aunque este procedimiento no es quizás el único posible, el argumento es tan convincente que existe poca duda de que la relatividad general es, con mucho, la mejor formulación relativista de la gravitación, formulación que también tiene en cuenta el hecho de que todos los cuerpos caen con la misma velocidad. Además, se puede demostrar sin gran dificultad que para cuerpos lentos la relatividad general da casi los mismos resultados que la teoría de Newton. Las escasas diferencias son muy pequeñas: una de ellas se refiere a un efecto de un valor mínimo sobre la moción del planeta Mercurio respecto al cual la teoría newtoniana no se ajustaba a los hechos mientras que la relatividad general sí. Otras dos diferencias están relacionadas con la propagación de la luz. Una de ellas puede inferirse partiendo de los primeros principios fundamentales, pero es difícil observarla experimentalmente, lo que se ha logrado muy recientemente. La otra está relacionada con el efecto de la gravitación sobre los rayos de luz; también en esto los resultados de las observaciones están en buen acuerdo con la relatividad, que predice sólo un efecto muy pequeño.

Recapitulando: nos vemos forzados a abandonar la gravitación newtoniana porque no es relativista. Si tratamos de formular una teoría relativista de la gravitación no podemos eludir la necesidad de tener en cuenta el hecho de que todos los cuerpos caen con la misma velocidad, lo que nos conduce, casi ineluctablemente a la teoría de Einstein. Experimentalmente ésta va más allá que la teoría de Newton, aunque no mucho más.

LA TEORIA CUANTICA

No necesitamos decir aquí mucho sobre los importantes conocimientos que durante los últimos 50 años se han obtenido sobre la estructura de los átomos y sus núcleos y sobre el comportamiento de las partículas subatómicas. Es sabido que la física que estudia tales fenómenos se diferencia de la de los cuerpos de mayor tamaño, debido fundamentalmente a que la influencia de los medios usados para la observación sobre el fenómeno observado no es ya una magnitud despreciable. Cuando trabajamos con los entes del más ínfimo tamaño, los instrumentos que empleamos no pueden ser aún más finos que dichos entes. Esto introduce indeterminaciones e incertidumbres de cuya formulación se ocupa la teoría cuántica. El primer paso fue la cuantización de la dinámica (mecánica cuántica); su primera aplicación fue a la moción de los electrones en el campo de un núcleo cargado. Dicho campo es electromagnético, pero en sus efectos es sólo electrostático. Gracias a una premisa fundamental de la teoría cuántica, el campo electrostático mismo no necesita ser cuantificado debido, esencialmente, a que no puede transmitir información; se considera simplemente como una especie de halo que rodea el núcleo central. En esta primera etapa del desarrollo de la teoría sólo se tenían en cuenta las indeterminaciones debidas a la imposibilidad de observar el comportamiento de los cuerpos ante fuerzas conocidas. La mecánica cuántica, en su sentido más estricto, es suficiente para el estudio de los rasgos básicos de las estructuras atómicas ya que en ese caso el campo es de un especial tipo electrostático, que obedece a la ley de la inversa del cuadrado, y no necesita ser cuantificado. Este paso — la cuantificación — sólo se dio más tarde, para el campo de la radiación electromagnética, donde condujo a graves complicaciones y dificultades que sólo muy recientemente han podido ser superadas.

LAS ONDAS GRAVITATORIAS

Es requisito fundamental de la teoría cuántica que más allá de un cierto grado de precisión, no hay forma de determinar simultáneamente la posición y cantidad de movimiento de una partícula. El campo gravitatorio debido a un cuerpo es de magnitud apreciable sólo si la masa de éste es muy grande. Por otra parte, el efecto gravitatorio es aditivo, es decir que la mitad de la masa produce la mitad del efecto gravitatorio de toda la masa. Si se acepta esta regla hasta el límite — y no existe prueba en contra — debería tener campo gravitatorio hasta una sola partícula subatómica, tal como un protón, un neutrón o incluso un electrón. Desde luego estos campos gravitatorios son extraordinariamente débiles ya la masa de las partículas es tan pequeña y quedan completamente eclipsadas por los campos eléctricos, que son mucho más fuertes (el factor es 10^{39}). Sin embargo, si es, en principio, imposible medir simultáneamente la posición y el momento de la partícula, entonces será también imposible hallarlos incluso mediante una determinación increíblemente exacta del campo gravitatorio. El campo gravitatorio debe ser también cuantificado, para que concuerde con el resto de la física. De nuevo la unidad de la física exige esto, aunque por lo que se refiere a la medida misma estamos muy lejos de demostrar su necesidad. Sin embargo, desde un punto de vista lógico esto no afecta la necesidad de cuantificar el campo gravitatorio, lo

que ha de hacerse para asegurarnos de que se aplican a los experimentos gravitatorios las mismas limitaciones de observabilidad de las partículas pequeñas. No se necesita llevar a cabo este proceso difícil, sin embargo, si el campo gravitatorio es simplemente un «halo» que rodea a la partícula. Así como en la teoría cuántica no es necesario cuantificar el campo electrostático de la partícula central, que sigue la ley de la inversa del cuadrado, así probablemente tampoco sería necesario cuantificar el campo gravitatorio si éste fuese simplemente un campo que sigue la ley de la inversa del cuadrado. Sin embargo, si existe en la gravitación también un campo de radiación, éste ha de ser cuantificado lo mismo que lo fue el campo de la radiación electromagnética. Así pues nos vemos conducidos desde dos direcciones diferentes a preguntar si existen estas ondas gravitatorias: por analogía con el electromagnetismo, donde la aplicación de la relatividad nos llevó de consideraciones estáticas a campos de ondas; y también debido a la teoría cuántica, que exige la cuantificación del campo gravitatorio si de verdad existen esas ondas gravitatorias.

Finalmente, está la natural curiosidad científica. Desde hace más de 40 años disponemos de una teoría satisfactoria — la de Einstein — sobre el campo gravitatorio, y nos parece justo ahora aplicarla también al campo gravitatorio de partículas en rápida aceleración, aunque tal campo no pueda observarse en la naturaleza debido a una causa que parece ser enteramente accidental: la inexistencia de cuerpos de gran masa y suficientemente rápida aceleración. Así, la exigencia de la unidad de la ciencia física da interés al problema de la existencia de tales ondas, aunque la verificación experimental de éstas haya de ser poco probable durante mucho tiempo aún.

Una vez planteada la cuestión es sorprendente que sea tan difícil obtener una respuesta; las dificultades son principalmente de orden matemático. Excepto en sus aplicaciones más sencillas, las ecuaciones que describen la relatividad general son muy complejas y difíciles. Existe además una peculiaridad física en su estructura. Debido a la unificación de inercia y gravitación nos permiten usar cualquier sistema de referencia, y no es fácil especificar suficientemente un sistema de referencia sin violar la flexibilidad del espacio-tiempo, que es una característica esencial de la teoría. Se han utilizado varios métodos de aproximación y algunos de ellos, al menos, son bastante sospechosos. Sin embargo, se ha realizado considerable progreso en años recientes y se han derivado bastantes resultados.

En primer lugar, ¿cómo pueden generarse las ondas gravitatorias? La idea más simple que se nos ocurre es la propagación de cambios gravitatorios y pudiéramos expresarla en forma de pregunta: si el Sol cesase de existir de repente ¿cuanto tardaría la Tierra en abandonar su órbita? Sin embargo, esta es una pregunta sin sentido. Las leyes de la gravitación involucran la ley de la conservación de la materia y por consiguiente dentro del marco de la teoría gravitatoria el Sol no puede cesar de existir. Podemos luego considerar lo que pasaría si, en vez de cesar de existir, el Sol se desplazase de repente en dirección normal al plano de la órbita terrestre. ¿Cuanto tiempo pasaría hasta que se notasen sus efectos? La pregunta carece de nuevo de sentido porque las leyes de la gravitación presuponen la conservación de cantidad de movimiento y por lo tanto el Sol no puede desplazarse lateralmente. Existen, sin embargo, cambios posibles. El Sol podría de repente convertirse en un esferoide prolato u oblato y tal transformación afectaría sin duda la órbita de la Tierra. Asimismo, el Sol podría explotar y dividirse en dos partes que se moviesen en direcciones opuestas. Esas posibilidades son perfectamente razonables, y cualquier teoría debería, al menos en principio, dar una respuesta clara a los problemas planteados.

Resulta que la velocidad de propagación de la información gravitatoria es la velocidad de la luz; lo cual no es sorprendente pues está enmarcada en la estructura del espacio-tiempo. En toda la física la transmisión de información está ligada íntimamente al transporte de energía, aunque no existe una ley simple que determine la cantidad de energía necesaria para transmitir una cantidad dada de información. Para estudiar la cuestión antes propuesta, el físico relativista considera un cuerpo rodeado de espacio vacío y se pregunta cómo afectan la masa del cuerpo los cambios en la forma. Los cambios de forma implican cambios del campo gravitatorio y, por tanto, implican también de un modo necesario propagación de información, mientras que la masa de un cuerpo es la medida más conveniente de su energía. En una manera cruda: los cambios de forma de un cuerpo irradian algo de su masa.

Para formular esta pregunta correctamente no es suficiente establecer que el espacio que rodea al cuerpo esté vacío, frase que en la teoría relativista significa la exclusión no sólo de la materia sino también de todo otro campo, excepto los

gravitacionales. Sin embargo, si existen ondas gravitatorias portadoras de energía, entonces tales ondas pueden no sólo ser producidas por el cuerpo y propagarse alejándose de él, sino que también pueden venir hacia el cuerpo desde grandes distancias y comunicarle energía. Para excluir tales ondas hay que aplicar una «condición de radiación extroversa», además de exigir que el espacio esté vacío. Tal condición está relacionada estrechamente con la aplicación del principio de causalidad: que los efectos de los cambios de forma sólo deben producirse después de los cambios mismos. Pues la condición de radiación extroversa también prohibe que se acerquen ondas específicamente ordenadas para adaptarse a los cambios de forma del cuerpo que pudieran considerarse ondas debidas a esos cambios pero propagándose hacia el pasado. Así pues, la condición no sólo impide un influjo indiscriminado de energía sino también una violación de nuestras nociones de la causalidad. La formulación de una condición adecuada de este tipo no es fácil, y es consolador hallar que tres formulaciones diferentes han resultado equivalentes, al menos en un caso de importancia especial.

Una cuestión con ésta relacionada se refiere al origen de la información propagada por las ondas que se alejan del cuerpo: ¿cómo puede un cuerpo aislado cambiar de forma, especialmente cuando ha debido estar aislado durante tanto tiempo que el campo gravitatorio que lo rodea no conserva memoria de haberse puesto allí el cuerpo? Nótese que estos cambios deberían ser en cierto modo inesperados, de manera que las ondas transmiten realmente nueva información. El mecanismo más simple parecería ser una bomba de relojería con un detonador que necesite un tiempo muy largo para explotar y sea lo bastante deficiente para que que no pueda predecirse su comportamiento. De esta forma pueden satisfacerse todas las condiciones del problema.

La solución matématica es todavía muy incompleta. Sólo se ha podido desarrollar algunos métodos de aproximación cuya validez no está enteramente fuera de duda. Uno de estos métodos es muy largo y complicado y hasta la fecha su aplicación se ha limitado a un caso especial. Otro, también de gran longitud, plantea algunas dudas acerca de la ambigua formulación de las condiciones que han de ser satisfechas a grandes distancias. Un tercer método, más corto que los otros, se limita enteramente a la consideración del campo lejos de la fuente. En este último no existen dificultades serias para satisfacer todas las condiciones a distancias grandes de la fuente, pero no se puede describir qué campo distante específico esté producido por qué tipo de movimiento de la fuente.

Sin embargo, se han obtenido algunos resultados sin ambigüedades y, al menos, pueden formularse otras preguntas más. Así, se sabe que si un sistema inicialmente estático sufre algunos cambios de forma y se vuelve estático de nuevo, entonces su masa en el estado final es menor que su masa en el estado inicial en una cantidad proporcional a los cuadrados de las velocidades de cambio del campo sumados durante el período de cambio. La restricción de que los estados inicial y final sean estáticos se debe a que sólo conocemos bien los campos estáticos y a que sólo ellos admiten una definición sin ambigüedades de la masa del sistema. Así, se ha establecido que un sistema puede irradiar parte de su masa, aunque esto es sólo un efecto de segundo orden de los cambios de forma y no una causa primaria de radiación como en el caso hipotético de la desaparición del Sol.

Se sabe que la estructura de una onda gravitatoria es completamente transversal. Así, si una onda de duración limitada incide sobre un enjambre de partículas en reposo relativo entre sí, después del paso de la onda no habrá movimiento relativo de las partículas paralelo a la dirección de propagación. En una dirección transversal las partículas se separarán y en otra dirección, perpendicular a la primera, se acercarán. A grandes distancias de la fuente una sección limitada de la onda es casi plana; estas ondas gravitatorias planas son bastante bien conocidas. A pesar de la complejidad de las ecuaciones, se propagan sin cambio de forma y sin dispersión. Se comportan en esto como las ondas electromagnéticas (que, sin embargo, se pueden superponer linealmente, lo que no es posible en las ondas gravitatorias) y son diferentes de las ondas sonoras, que se agrupan para formar ondas de choque. Esta constancia de la forma está sin duda relacionada con la naturaleza transversal de las ondas.

Se entiende bastante bien, al menos en principio, la construcción de un receptor de ondas gravitatorias. Supongamos que dos esferas de gran masa pueden deslizarse a lo largo de una varilla rugosa pero que están fijadas mediante muelles a posiciones diferentes. Si entonces una onda se propaga perpendicularmente a la varilla tiende a hacer moverse las esferas, una respecto a la otra, como las partículas del enjambre mencionado antes. Esto nos lleva a un movimiento

relativo de las esferas y de la varilla y por tanto se desarrolla calor de fricción. Así, parte de la energía de la onda se ha convertido en calor, que es energía localizada; y ha habido, pues, «recepción» de la onda. La misma respuesta del sistema receptor lleva a re-radiación; por tanto un receptor sólo puede capturar una cantidad limitada de energía de una onda dada. Para que esta cantidad sea lo mayor posible, el movimiento de las esferas no ha de ser ni muy pequeño ni muy grande; así, los conceptos de impedancia y acoplamiento se aplican en el caso gravitatorio lo mismo que en el electromagnético.

Una cuestión fascinante surge del descubrimiento de que el campo gravitatorio distante puede ser cambiado en formas específicas (pero bastante numerosas) sin que exista radiación alguna. Un cambio tal no puede empezar o acabar sin la presencia de radiación. ¿Qué movimientos de la fuente pueden ser la causa de tales cambios no radiativos del campo? Los métodos actuales nos dan poca indicación, pero hay dos argumentos contradictorios que tienen cierto peso. Según el primero es la falta de aceleraciones de las partículas que forman la fuente lo que conduce a la ausencia de radiación a pesar del movimiento de la fuente. Esto cuadra bien con la radiación electromagnética y con el primer término de un método especial de aproximación, pero ninguno de estos argumentos es necesariamente importante. El argumento opuesto subraya que la falta de aceleración no es importante en la teoría gravitatoria, porque las órbitas naturales de las partículas no son aceleradas, sino de caída libre bajo la gravitación. Desde este punto de vista, una nube de polvo es la fuente más probable de cambios no radiativos, pues en tal nube todas las partículas se mueven libremente. Pero si una nube de polvo no irradia, no parece probable que lo haga un sólido pasivo; (una bomba de relojería, el prototipo de irradiador es, por contraste, muy activo). Expresado de una forma más matemática, la relación entre presión y densidad es independiente del tiempo en una nube de polvo o en un sólido elástico, pero es dependiente del tiempo en una bomba. Si existe alguna forma de fricción interna — elasticidad imperfecta, viscosidad, etc, — esta relación depende de la dirección en que transcurre el tiempo y los procesos que ocurren son irreversibles. Es pues tentador sugerir que la clase importante de los campos dependientes del tiempo (pero no radiativos) a gran distancia son producidos enteramente por cambios reversibles en la fuente del campo; pero esta suposición carece totalmente hasta la fecha de demostración. Si fuese acertada, existiría bastante menos radiación gravitatoria en el Universo. Así, el sistema solar radiaría aproximadamente un kilovatio en ondas gravitatorias, si éstas son producidas por todas las aceleraciones; pero sólo una fracción de un milivatio si sólo producen radiación los procesos irreversibles, tales como la fricción de las mareas. El problema es fascinante pero no parece existir una forma fácil de resolverlo.

Finalmente podemos hacer referencia a otro problema también sin resolver: la aplicabilidad del principio de Huygens a las ondas gravitatorias. Todas las ecuaciones de ondas prohiben la transmisión de cualquier influencia a velocidades que excedan la velocidad característica, pero sólo algunas implican que todas las influencias se transmiten necesariamente a tal velocidad. Así, la ecuación ordinaria de las ondas sonoras de pequeña amplitud muestra que en las ondas sonoras planas y esféricas toda la influencia se mueve con la velocidad del sonido; por ejemplo, después del paso de un impulso breve, el medio está de nuevo completamente en reposo. Sin embargo, en el caso de ondas sonoras cilíndricas, mientras que hay reposo delante del impulso, detrás de él hay una perturbación, pues parte de la energía se trasmite a velocidades inferiores a la del sonido. Así, el principio de Huygens, según el cual toda la perturbación se transmite con la velocidad característica, queda satisfecho para ondas planas y esféricas, pero no para las cilíndricas. En el caso de las ondas gravitatorias se sabe que el principio de Huygens se aplica a las ondas planas y no a las cilíndricas, pero el caso físicamente más importante de las ondas esféricas (radiación desde un sistema aislado) es muy oscuro, por razones puramente matemáticas. Una solución de este problema aclararía otras muchas incertidumbres en esta materia.

BIBLIOGRAFIA

[1] EINSTEIN, A. «Meaning of Relativity» (4ª edición). Princeton University Press, Princeton. 1950.

[2] *Idem.* «Principle of Relativity» (15ª edición). Methuen & Co. Ltd., Londres. 1954.

[3] RUSSELL, Bertrand. «A.B.C. of Relativity». George Allen and Unwin Ltd., Londres. 1958.

[4] COULSON, C. A. «Waves» (7ª edición). Oliver and Boyd Ltd., Edimburgo. 1955.

[5] LANDAU, L. D. y RUMER, G. B. «What is Relativity?» (traducido por N. Kemmer). Oliver and Boyd Ltd., Edimburgo. 1960.

El destello verde y fenómenos afines

D. J. K. O'CONNELL

Cuando el Sol está cerca del horizonte se observan fenómenos jamás vistos a ninguna otra hora. Quizá el más espectacular sea el breve destello verde que puede verse a veces. Antes se suponía que era un fenómeno fisiológico, pero la fotografía en colores ha mostrado que tiene realidad física: su existencia puede explicarse mediante las leyes ordinarias de la óptica. El fenómeno depende no sólo de las condiciones existentes cerca de la superficie, sino también de las de la alta atmósfera, y su conocimiento puede ser útil para la investigación de la última.

Muchos viajeros en los mares tropicales conservan recuerdos de magníficas puestas de Sol, con cambiantes colores que se extienden sobre una gran parte del cielo. Algunos han podido ver además un fenómeno fugaz cuando, en el momento final de la puesta del Sol, el último segmento de éste se vuelve de un verde brillante. Este es el destello verde, o rayo verde como a veces se le llama. El primero parece un nombre más apropiado pues lo que se ve es una estrecha franja horizontal verde. Una sucesión de destellos verdes puede, sin embargo, aparecer al ojo desnudo como un rayo que saliese del Sol (Fig. 2).

No hace falta ir a los trópicos para ver el destello verde: puede observarse en cualquier latitud sobre la tierra y sobre el mar. A veces es también visible a la salida del Sol (Fig. 5). El destello no es necesariamente verde; puede ser azul o violeta. Lord Kelvin [1] describió un destello azul que había observado en 1899 al salir el Sol sobre el Mont Blanc. La primera descripción publicada del fenómeno es la de D. Winstanley [2] en 1873: «El rayo verde empieza en los vértices del segmento visible del Sol, y, cuando la puesta de éste casi está completa, se extiende desde ambos vértices al segmento central, donde produce un destello momentáneo e intenso de luz visible al ojo desnudo.» Es ésta una descripción excelente de la forma en que se ha observado a menudo el destello verde desde mi laboratorio. Winstanley cita una carta de Joule, que describe sus propias observaciones y las anteriores de Baxendell. La primera observación que he podido encontrar es de Swan y data de 1865 [3]; al amanecer vio desde Righi un relámpago deslumbrador color verde esmeralda sobre una montaña distante. Sin embargo, no publicó tal observación hasta 1883, quizá después de leer la novela de Julio Verne, *Le rayon vert*, aparecida en 1882 y que parece haber despertado interés general por esta materia. Por lo menos se ha escrito mucho desde entonces [4–6].

Han estado divididas las opiniones acerca de la naturaleza del destello verde. Muchos mantienen que es meramente un fenómeno subjetivo que resulta de la fatiga de la retina, de tal forma que se ve el color complementario después del deslumbramiento por los rayos rojizos del Sol poniente. Es curioso que ésta fue la opinión de Swan después de hacer la observación mencionada arriba, aunque parece evidente que el destello verde a la salida del Sol no puede ser resultado de fatiga retinal; Swan lo achacó al color rojizo del cielo al amanecer.

Por otra parte, muchos científicos creen que se trata de un fenómeno objetivo [7]. Yo he mantenido esta opinión firmemente desde que ví por vez primera el destello a la puesta del Sol sobre el Mediterráneo, desde la ventana de mi oficina en Castel Gandolfo y me pareció interesante decidir la controversia mediante fotografía en colores del fenómeno. El Observatorio Vaticano en Castel Gandolfo está bien situado para tal experimento: hay una vista sin obstáculos por encima de la campaña romana hacia el Mediterráneo, y pueden enfocarse directamente los telescopios hacia el horizonte a unos 80 km de distancia. No fue tarea fácil, pero — gracias a la habilidad y paciencia de C. Treusch, S.J., constructor de instrumentos del observatorio — se han tomado muchas fotografías no sólo del destello verde en el ocaso sobre el mar y sobre tierra y también al amanecer, sino de otros fenómenos con él relacionados [6].

TEORIA DEL DESTELLO VERDE

Los factores principales que originan el destello son la dispersión y la absorción de la luz solar en la atmósfera de la Tierra. La velocidad de la luz disminuye al aumentar la densidad del aire, de tal

forma que un rayo de luz es refractado a su paso a través de la atmósfera, a no ser que su origen esté justo en el cenit. El rayo se desvía hacia la vertical en relación a su dirección original; por tanto el Sol o una estrella aparecen más altos en el cielo que lo que están en realidad. La refracción aumenta con la distancia al cenit y los rayos de longitud de onda más corta (violeta, azul y verde) se desvían más que los de longitud de onda más larga. El resultado neto es que la imagen de una estrella se descompone en un espectro, con el azul o verde encima y el rojo debajo y la longitud del espectro aumenta al disminuir la altura. Este efecto aparece muy claro en una fotografía de Venus tomada cuando estaba cerca del horizonte (Fig. 7): puede verse una serie de imágenes del planeta en colores diferentes. El Sol, cuando está cerca del horizonte, tiene un borde verde estrecho por encima y un borde rojo por debajo, pero ninguno de los dos es visible a simple vista (Fig. 4).

El aire no sólo refracta la luz sino que también la absorbe. Al ponerse una estrella, su luz atraviesa un espesor de aire cada vez mayor, la absorción aumenta y la estrella aparece más débil. Sin embargo, la absorción no es uniforme en todo el espectro. Algunos constituyentes normales de la atmósfera, como el vapor de agua, el oxígeno y el ozono, absorben unas longitudes de onda más que otras. El resultado es que ciertos colores se debilitan más que otros al acercarse una estrella al horizonte. Las bandas de absorción debidas al vapor de agua, llamadas a menudo bandas de Brewster, quien las descubrió, afectan los rayos naranja y amarillo muy fuertemente; a veces, al ponerse el Sol, la luz naranja y amarilla casi desaparece, de tal forma que hay un vacío en el espectro y una transición brusca del rojo o rojo anaranjado al verde.

Otro factor que influye en el destello es la dispersión de la luz solar por las moléculas de aire, Debido a esta dispersión, que es también la causa de que el cielo sea azul, los colores violeta y azul de la luz solar se debilitan más y más al acercarse el Sol al horizonte. Cuando el resto del Sol se ha ocultado ya detrás del horizonte sólo queda una franja verde estrecha, pues el azul y el violeta ya no son visibles. En esas condiciones puede verse un destello verde en el último momento de la puesta. El destello puede incluso aparecer completamente separado del disco solar (Fig. 3) y flotar encima del horizonte cuando el Sol ya ha desaparecido. A grandes alturas y cuando el aire está muy claro, puede todavía verse el azul durante la puesta y el destello puede ser verde azulado, azul, o, mucho más raramente, violeta.

El polvo y la neblina pueden producir una absorción general de la luz solar, así como una absorción selectiva o dispersión de longitudes de onda especiales. En general el polvo y la neblina hacen menos probable la aparición del destello verde, especialmente cuando el Sol está muy rojizo. Por otra parte, ciertas condiciones pueden aumentar la intensidad o duración del destello y facilitar su observación. Cuando la temperatura del aire aumenta con la altura se forma en la atmósfera lo que se llama una capa de inversión y en esas condiciones ocurren espejismos. J. Evershed [8], a bordo de un barco en los trópicos, vio a menudo un destello verde brillante en el ocaso y notó que en cada ocasión había un espejismo notable causado por una capa de inversión delgada cerca del mar. «A la puesta del Sol, el último segmento del disco que desaparecía fue . . . reflejado e invertido, dando lugar a una forma lenticular con los vértices levantados como un minuto por encima del horizonte. El destello verde ocurrió cuando los vértices bordeados de verde se fundieron en un todo brillante. . . . Me parece evidente . . . que la capa de inversión intensifica grandemente el efecto de la dispersión ordinaria al añadir la luz de la imagen reflejada a la de la imagen directa en el momento de la puesta.» En la Fig. 1 pueden verse reflexiones en las capas de inversión. La confirmación experimental del aumento de la intensidad del destello verde debido al espejismo ha sido dada por T. S. Jacobsen [9], que fotografió el espectro del destello y comparó la intensidad de su luz verde con la intensidad de la luz verde en el espectro del Sol cuando éste está bajo.

La duración del destello depende de la velocidad a la que sale o se pone el Sol, lo que depende de la estación. La anchura vertical del borde verde es de unos diez segundos de arco, que, en las latitudes medias, sólo tarda una fracción de segundo en pasar debajo del horizonte. Las condiciones atmosféricas pueden aumentar la anchura del borde verde, con un aumento correspondiente de la duración del destello. En Castel Gandolfo se han visto a menudo destellos de uno o dos segundos de duración y aún más; al mismo tiempo, nuestras medidas de la anchura del borde verde han alcanzado y a veces superado treinta segundos de arco.

El Sol se pone más despacio y el destello dura más a medida que nos acercamos a los Polos. En Hammerfest (79°N), en un período del año, puede durar hasta 14 minutos, siete minutos mientras se oculta el Sol detrás del horizonte y otros siete minutos al orto que sigue inmediatamente a ese

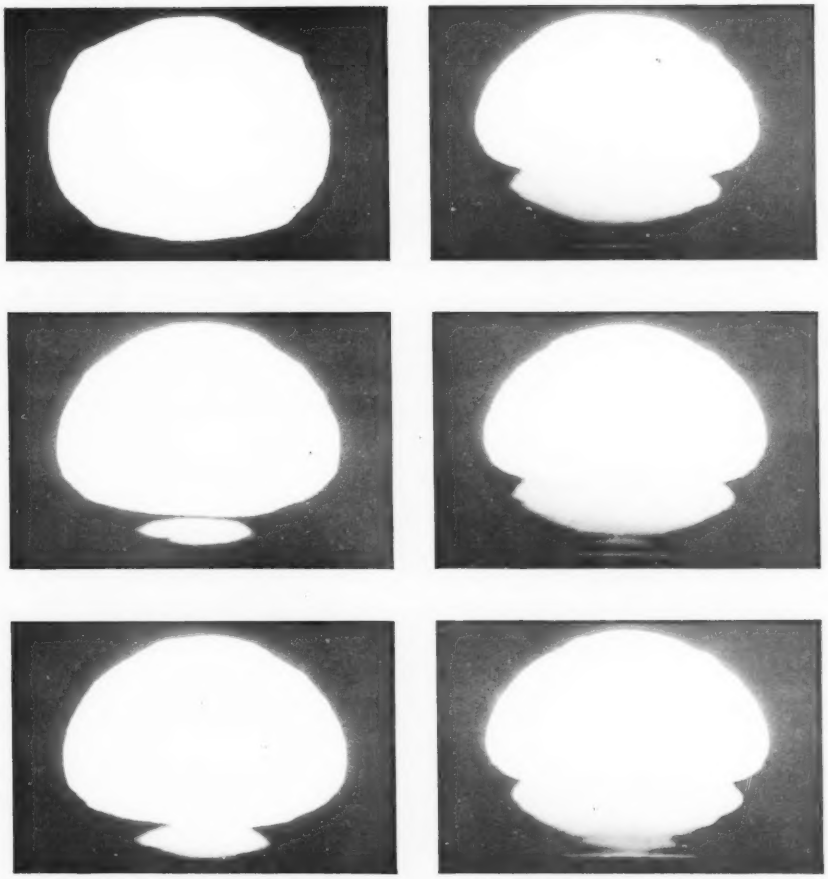


FIGURA 1 – *Se tomó esta fotografía con una máquina Robot (7 cm de abertura, focal de 100 cm) el 15 Septiembre 1956 para mostrar lo que se puede lograr con un foco relativamente corto. Las distorsiones del disco solar aparecen bien, pero no es posible obtener con una longitud focal de sólo un metro fotografías reproducibles en color del destello verde. Sin embargo, los efectos de una «banda ciega» aparecen bien claros. En* e *puede verse un destello rojo pequeño. Unos tres minutos más tarde apareció un destello verde en el mismo punto.*

FIGURA 2 – *Destello verde múltiple al salir el Sol. Al observarlos a simple vista, una serie de destellos verdes surgiendo del borde solar, como los reproducidos aquí, pueden dar la impresión de un «rayo» verde. (Tomada con el refractor de 40 cm.)*

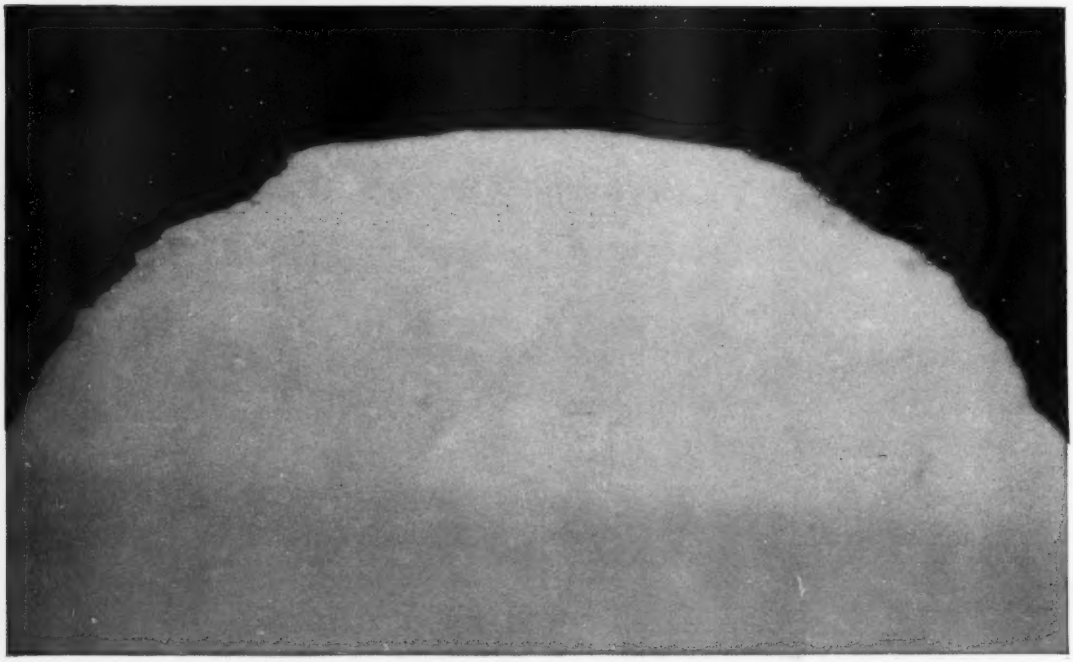


FIGURA 3 – *Destello verde observado poco antes de la puesta del Sol sobre el Mediterráneo. (Tomado en Kodachrome con el reflector de 60 cm.)*

FIGURA 4 – *Bordes verde y rojo, con un destello rojo, que duró como un segundo, el 13 Agosto 1954. Debajo del destello puede verse el horizonte, una línea roja oscura causada por la reflexión del borde rojo sobre el mar. (Tomada en Ferraniacolor Invertibile con el reflector de 60 cm, cerrado hasta 10 cm.)*

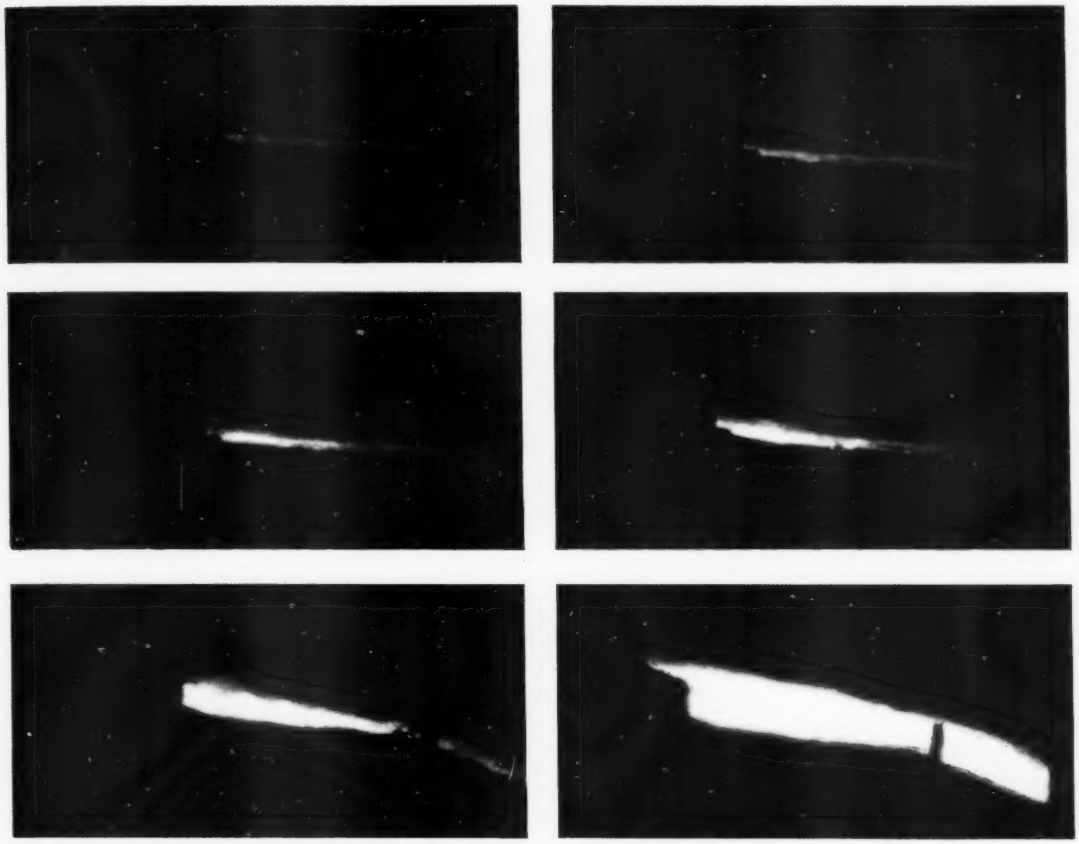


FIGURA 5 – *Destello verde visto al salir el Sol detrás de un castillo medieval en Rocca Priora, 16 Julio 1956. (Tomado en Ektachrome con máquina Robot, 3 fotografías por segundo, 1/250 de segundo, con la lente de 40 cm cerrada hasta 10 cm.)*

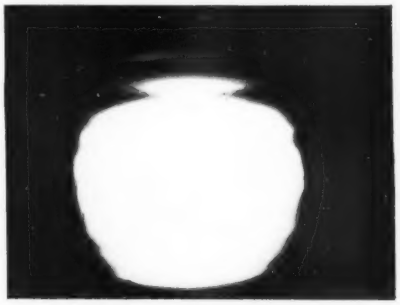


FIGURA 6 – *Destellos artificiales azules y rojos. (Tomados con Zeiss-Tessar en Ektachrome B, en la forma descrita en el texto.)*

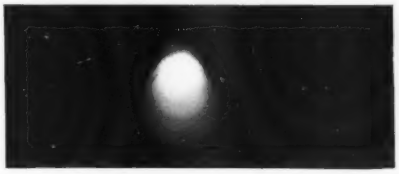


FIGURA 7 – *Ocaso de Venus. (Tomado en Ektachrome Daylight con el refractor de 40 cm, 10 segundos de exposición. Ampliación* × 23,7.)

ocaso [10]. El período es aún mayor cuando el Sol sigue al salir y al ponerse el perfil de una montaña. M. Minnaert [11] pudo mantener la observación del fenómeno desplazándose a lo largo de una pendiente a la velocidad apropiada. La duración más larga que se ha registrado es la comunicada por la expedición antártica de Byrd en Little America (78°S), en 1929, cuando el Sol siguió el horizonte irregular de la barrera de hielo y se vio aparecer y desaparecer el destello verde durante 35 minutos. Había una inversión fuerte de temperatura cerca del hielo, lo que sin duda aumentó la intensidad.

Como se ha explicado más arriba, la refracción hace que el Sol aparezca en el cielo más alto que lo que realmente está. En el ocaso, la imagen del Sol se levanta tanto que el astro se ve cuando en realidad está ya debajo del horizonte; en otros términos, la refracción retrasa la puesta del Sol, de la misma manera que adelanta la salida. En el ocaso sobre el Mediterráneo, como se observa desde Castel Gandolfo, el Sol aparece elevado por refracción de 1,3°, unas 2,5 veces el diámetro solar, por término medio, y su desaparición se retrasa por varios minutos. La magnitud de la refracción varía con las condiciones atmosféricas: puede a veces ocurrir que la refracción sea apreciablemente mayor que la normal. En este caso, el ocaso, además de retrasarse, dura más que de ordinario y también aumenta la duración del destello. Existen ejemplos de casos notables de refracción anormal. El más sorprendente es el comunicado por marinos holandeses en Nueva Zemlia en 1597: vieron el Sol durante 14 días cuando hubiera debido estar debajo del horizonte; le refracción era de más de 4°. Esta información fue estudiada por Kepler y otros, y muchos llegaron a la conclusión de que la observación era imposible y que debería haber alguna confusión en las fechas, debida a la reciente reforma gregoriana del calendario. Sin embargo, las observaciones eran muy correctas, como ha mostrado recientemente S. W. Visser [12], quien señala que Sir Ernest Shackleton notó un fenómeno semejante en el mar de Weddell en su última expedición antártica en 1915.

Puesto que la formación del destello verde puede estar influída por tantos factores no es sorprendente que su aparición parezca muy caprichosa. Por ejemplo, R. G. Aitken lo vio a la puesta del Sol desde el observatorio de Lick muy regularmente durante un largo período, pero otras veces lo buscó en vano [13]. Ha sido observado desde muchas partes de la Tierra, pero es más probable verlo en los mares tropicales, o en montañas altas o en el aire claro de Egipto. Hay razones para suponer que había sido observado por los antiguos egipcios [14]. Puede verse muy frecuentemente en Egipto a la puesta y aún más fácilmente a la salida del Sol, pues entonces el aire es especialmente claro y libre de polvo.

El destello verde es tan estrecho que está por debajo del poder resolutivo del ojo humano; sólo puede verse a simple vista cuando ha desaparecido el disco solar y el destello permanece por un instante encima del horizonte. Es mucho más fácil verlo si se utilizan anteojos o un telescopio pequeño, aunque, desde luego, hay que tener mucho cuidado para no dañarse los ojos al hacerlo. Puede utilizarse entre el ocular y el ojo un filtro neutro que reduzca la intensidad de la luz sin alterar su color; la razón de utilizar un instrumento óptico es aumentar la ampliación. A menudo puede verse bastante bien el destello verde con unos anteojos pequeños, incluso cuando no es visible a simple vista. Sin embargo, si se quieren distinguir los muchos detalles finos, tal como han sido fotografiados frecuentemente, es necesario tener un telescopio de distancia focal bastante grande.

LAS FOTOGRAFIAS DEL OBSERVATORIO VATICANO

Muchos han tratado de fotografiar en colores el fenómeno con una máquina de foco corto. Al fallar el intento, dedujeron que el fenómeno es subjetivo. Las fotografías del Observatorio Vaticano fueron tomadas con un reflector Zeiss de 60 cm (distancia focal de 240 cm) o con el refractor Zeiss de 40 cm (distancia focal de 600 cm). Al principio utilizamos el reflector para asegurarnos de que no se introducían efectos cromáticos extraños debidos al instrumento óptico. Experimentos posteriores mostraron que las fotografías tomadas con el refractor estaban libres de tales efectos, y se utilizó este telescopio para la mayor parte de las fotografías posteriores.

Las primeras fotografías en color fueron tomadas en película Kodachrome; era un procedimiento muy lento pues había que mandar la película al extranjero para revelarla. Más tarde usamos película Ektachrome casi exclusivamente pues tiene la gran ventaja de que se puede revelar en el laboratorio mismo. Fueron necesarias bastantes pruebas para encontrar la exposición correcta, pues la intensidad de la luz cambia y los efectos fotografiados son muy fugaces. Al determinar el tiempo de exposición correcto había que tener en cuenta no sólo la duración del fenómeno

sino también asegurarse de que los colores fotografiados corresponden con exactitud a los vistos al mismo tiempo en el telescopio.

Visto desde Castel Gandolfo, el Sol se pone sobre el Mediterráneo durante la mayor parte del año y la mayoría de las fotografías del fenómeno fueron así tomadas. También se han hecho fotografías al ponerse el Sol sobre la tierra cuando, en cierta época del verano, el Sol se oculta detrás de las montañas Tolfa, a unos 90 km de distancia [15]. La fotografía del destello verde a la salida del Sol (Fig. 5) es mucho más difícil. Ha de apuntarse el telescopio precisamente a donde vaya a aparecer el fenómeno y estimar por adelantado el instante exacto de la aparición y la exacta exposición. Para que sea más difícil aún, nuestro horizonte oriental, las colinas Albanas, son bastante altas y cercanas y en su mayor parte cubiertas de bosque. A pesar de todo se han obtenido fotografías. También se han obtenido fotografías interesantes de los bordes azul y verde del Sol al aparecer sobre los bosques en la cumbre de las colinas.

Hay muchos fenómenos interesantes que observar y fotografiar cuando el Sol está cerca del horizonte. El astro aparece deformado, el borde inferior está más elevado por la refracción que el superior, de manera que el disco aparece comprimido verticalmente. La reflexión en el mar, o en una capa de inversión, le da la forma de una omega mayúscula (Ω). Existen a menudo capas de discontinuidad en la atmósfera donde cambia bruscamente la disminución de la densidad del aire al aumentar la altura. Estas capas causan las irregularidades que aparecen en el borde solar (Fig. 4). Una capa de inversión, es decir una capa de aire más caliente que la superficie de la Tierra debajo de ella, causa algunas veces una «banda ciega» que corta al disco solar en dos (Fig. 1; véase también [11]). En el borde inferior de la banda ciega aparece a veces un destello rojo y, poco después, cuando el borde superior del Sol está a la misma altura sobre el horizonte, puede aparecer uno verde. Tales destellos rojos y verdes han sido vistos y fotografiados a menudo en Castel Gandolfo (Figs. 1 y 4). Algunas veces se forman bandas verdes en el borde superior del Sol, que se separan gradualmente para producir un destello verde incluso antes de ponerse el Sol (Fig. 3). A veces se ha visto una sucesión de tales fuegos fatuos o destellos y se han tomado fotografías. La Fig. 2, tomada a la salida del Sol, muestra tres de esos destellos verdes, unos encima de otros. Mucho más raramente se ha visto un destello rojo debajo del Sol, el cual se ha fotografiado varias veces (Fig. 4). Venus presenta una vista interesante al ponerse, como se ve en la Fig. 7.

Es interesante estudiar los efectos del centelleo del borde solar: los cambios son tan rápidos que se necesita una cámara cinematográfica para seguirlos. Se han tomado buenas fotografías de efectos de centelleo y del desarrollo de bordes verdes desprendidos con una cámara cinematográfica (sin lente, naturalmente) unida al refractor de 40 cm. La gran distancia focal de este telescopio hace posible recoger detalles muy finos que se perderían con un instrumento más corto.

La Fig. 6 muestra los resultados de un experimento para producir destellos artificiales azules y rojos. Se coloca un espejo de vidrio sobre el suelo debajo de un objetivo de prisma de cuarzo de 60 cm de diámetro y 8° de ángulo refractor. La luz procedente de una lámpara en el techo (una esfera opal de 20 cm de diámetro) pasa a través del prisma, es reflejada por el espejo y pasa otra vez a través del prisma a una máquina fotográfica. Esta es una buena imitación de la imagen del Sol cerca del horizonte. Para reproducir el efecto de las capas de discontinuidad se colocan tres piezas de vidrio de ventana encima del prisma un poco inclinadas respecto a la horizontal.

REFERENCIAS

[1] KELVIN, Lord. *Nature, Lond.*, **60**, 411, 1899.
[2] WINSTANLEY, D. *Proc. Manchr. Lit. Phil. Soc.*, **13**, 1, 1873.
[3] SWAN, W. *Nature, Lond.*, **29**, 76, 1883.
[4] FISHER, W. J. *Pop. Astr.*, **29**, 251, 382, 1922.
[5] KUIPER, P. F. «De Groene Straal», Helder. 1926.
[6] O'CONNELL, D. J. K. «The Green Flash and Other Low Sun Phenomena». Observatorio Vaticano. North Holland Publishing Co., Amsterdam; Interscience Publishers Inc., Nueva York. 1958.
[7] Véase, por ejemplo, DANJON, A. y ROUGIER, G. *Ann. Obs. Strasbourg*, **1**, 105, 1926.
[8] EVERSHED, J. *Nature, Lond.*, **111**, 13, 1923.
[9] JACOBSEN, T. S. *J. R. astr. Soc. Can.*, **46**, 93, 1952.
[10] GUGLIELMO, G. *R. C. Accad. Lincei*, (5), **25**, 417, 1916.
[11] MINNAERT, M. «Light and Colour in the Open Air» (2ª edición), pág. 59, Dover Publications, Nueva York. 1954.
[12] VISSER, S. W. *Proc. R. Acad. Sci. Amst., B*, **59**, 375, 1956.
[13] AITKEN, R. G. *Leafl. astr. Soc. Pacif.*, **3**, 177, 1939.
[14] Véase [6], pág. 8.
[15] Véase [6], lámina XI.

Dispersión rotatoria óptica

CARL DJERASSI

Aunque hace cerca de 150 años que se sabe que el poder rotatorio varía con la longitud de onda (dispersión rotatoria óptica), su aplicación a problemas químico-orgánicos y bioquímicos es muy reciente. La medida de la dispersión rotatoria anómala ha proporcionado un método nuevo y valioso para resolver diversos problemas estructurales, estereoquímicos y cinéticos. En particular, se ha visto que la dispersión rotatoria constituye un método casi único para la determinación de la configuración absoluta de los compuestos orgánicos.

HISTORIA

Cerca de 140 años transcurrieron entre el descubrimiento inicial de J. B. Biot [1] del cambio del poder rotatorio específico con la longitud de onda y la aplicación de ese fenómeno a los problemas químico-orgánicos [2]. Durante el intervalo se llevaron a cabo muchas investigaciones, especialmente por químicos físicos, y las reseñas publicadas por tres de los precursores, T. H. Lowry, P. A. Levene y W. Kuhn [3], demuestran en general una preocupación comprensible por los aspectos teóricos. En todo este período, hasta 1954, se habían registrado menos de cien curvas de dispersión rotatoria óptica en la región ultravioleta del espectro, debido principalmente a la falta de instrumentos adecuados. En efecto, entre los años treinta, cuando el trabajo experimental de esos tres grupos de investigadores ya había cesado, y 1955 se publicó un número muy pequeño de trabajos sobre medidas de dispersión rotatoria óptica en el ultravioleta, y apenas puede citarse ningún ejemplo de que este método se utilizara para la solución de problemas químico-orgánicos o bioquímicos, en contraste con las claras indicaciones de la actividad y el interés actuales en dispersión rotatoria óptica, especialmente en sus aplicaciones a la química orgánica y a la bioquímica. Los avances en la instrumentación quedan patentes por el hecho de que en nuestros laboratorios se determinaron aproximadamente tres mil curvas de dispersión rotatoria ultravioleta en menos de ocho años. El hecho de que durante los últimos dieciocho meses se hayan publicado unos doscientos trabajos en los que las medidas de dispersión rotatoria ultravioleta se han utilizado para la solución de problemas químico-orgánicos o bioquímicos, proporciona una prueba cuantitativa de la aceptación general de este método.

PRINCIPIOS GENERALES

Para poder apreciar las causas de este resurgimiento, es necesario tratar brevemente de los aspectos dispersivo y absortivo de la dispersión rotatoria óptica. Un haz de rayos luminosos polarizado linealmente se puede considerar como resultante de dos haces componentes, uno levógiro y otro dextrógiro, polarizados circularmente. Si los dos componentes pasan a través del medio con igual velocidad, no se observa rotación, pero si el índice de refracción del medio es distinto para los dos componentes, el plano de polarización del haz emergente gira. Esta característica dispersiva constituye el fundamento de la polarimetría monocromática, por ejemplo, cuando se determina el poder rotatorio de una sustancia ópticamente activa para una longitud de onda determinada, normalmente la raya D del sodio (5890 Å). Además de diferencias en la velocidad de transmisión, se pueden presentar también diferencias en la absorción de los haces dextrógiro y levógiro. El haz emergente presenta entonces polarización elíptica y el efecto absortivo resultante se denomina dicroísmo circular. La combinación del dicroísmo circular con la rotación óptica se denomina efecto Cotton en honor de su descubridor. Como se verá, la utilización de la dispersión rotatoria óptica en química orgánica se basa principalmente en la medida experimental del efecto Cotton y en su correlación con características estructurales y estereoquímicas.

En esencia, la determinación experimental de una curva de dispersión rotatoria óptica es un proceso sencillo que implica la medida del poder rotatorio de una sustancia para distintas longitudes de onda en vez de solamente para la raya D del sodio, como es habitual. El aparato consiste esencialmente en una fuente luminosa, un monocromador que produce luz de cierta longitud de onda, un polarizador, una célula que contiene el material ópticamente activo en solución, un analizador y un dispositivo para medir el ángulo de rotación. El polarizador y el analizador en general

son prismas Rochon de cuarzo y el ángulo de rotación se mide visualmente cuando se trabaja con luz visible. Sin embargo, la mayoría de las sustancias orgánicas son incoloras y absorben solamente en la región ultravioleta; por tanto, si se desea medir el efecto Cotton de sustancias incoloras, las determinaciones de poder rotatorio se deben llevar a cabo con luz ultravioleta, y aquí es donde se presentan las dificultades experimentales. Todo el trabajo inicial en la región ultravioleta se hizo con la ayuda de laboriosos procedimientos fotográficos [3] y sólo después del desarrollo comercial del espectropolarímetro [2] ha sido posible la medida rápida y simple de curvas de dispersión rotatoria en el ultravioleta. Por ese método, la medida se puede hacer en una o dos horas, mientras que con el fotográfico se necesitaban varios días.

Se presentan dos tipos de curvas de dispersión [4]. La Fig. 1 muestra varias curvas sencillas, es decir, curvas de dispersión que no presentan máximos ni mínimos, sino que la rotación simplemente aumenta a medida que se avanza en el ultravioleta. Las curvas A y B de la Fig. 1 se denominan curvas sencillas positivas a pesar de que la curva B empieza en el lado negativo de la rotación en la región visible y cruza el cero del eje de rotación en el ultravioleta; la curva C se denomina sencilla negativa.

Las curvas de dispersión rotatoria anómalas son las que presentan máximos y mínimos de rotación como aparece (idealmente) en la Fig. 2. La curva A representa un efecto Cotton positivo único; la curva B es típica del efecto Cotton negativo, puesto que el primer valor extremo de la rotación al ir desde el visible al ultravioleta es un mínimo. Los máximos y mínimos de rotación se denominan picos y valles para no confundirlos con los máximos y mínimos de absorción en el ultravioleta. Así, el efecto Cotton positivo de la curva A en la Fig. 2 sería exhibido por una sustancia ópticamente activa con un cromóforo que absorbiese a una longitud de onda λ_0 situada aproximadamente en el punto medio, en unidades de longitud de onda, entre las posiciones del pico y del valle de la curva de dispersión rotatoria. La relación íntima entre el espectro de absorción y la dispersión rotatoria óptica proporciona, en general, una indicación de si una sustancia presentará una curva de dispersión rotatoria anómala en una región de longitud de onda determinada.

Las sustancias ópticamente activas que, como los hidrocarburos, los alcoholes y los ácidos carboxílicos, no absorben en las regiones accesibles del espectro presentan, en general, curvas sencillas

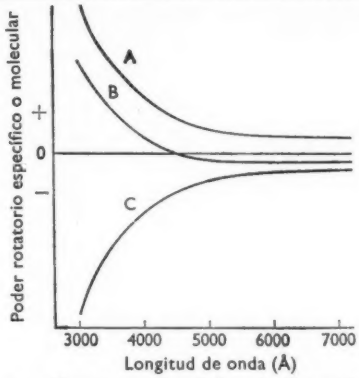


FIGURA 1 – *Curvas sencillas típicas de dispersión rotatoria (A y B, positivas; C, negativa).*

del tipo de las de la Fig. 1; mientras que las curvas anómalas se deben a sustancias que contienen un grupo cromóforo, tal como el grupo carbonilo o nitro, que absorbe en aquella región. En realidad, todas las curvas sencillas presentarían anomalías al acercarse a su respectiva banda de absorción ópticamente activa, pero en muchos compuestos estas bandas se presentan en zonas del ultravioleta tan alejadas o donde la absorción es tan intensa que no es factible la medida del poder rotatorio. Para aclarar este punto, basta notar que las curvas de dispersión rotatoria anómala de la Fig. 2 aparecen como curvas sencillas en el intervalo 7000–4500 Å y sólo se convierten en anómalas al acercarse a la región del máximo de absorción ($\lambda_0 = 3000$ Å).

Tanto de las curvas sencillas de la Fig. 1 como de las anómalas de la Fig. 2 se deduce que la rotación óptica es invariablemente mayor en el ultravioleta que en la gama visible. La elección de la raya D del sodio para las medidas de rotación monocromática fue por tanto poco afortunada. Para las medidas de rotación se requieren cantidades de sustancia ópticamente activa mucho

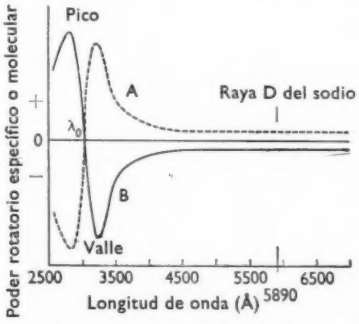


FIGURA 2 – *Curvas anómalas típicas de dispersión rotatoria (A, efecto Cotton positivo; B, efecto Cotton negativo).*

menores en el ultravioleta que en la gama visible y en nuestro laboratorio, la mayoría de las medidas de dispersión rotatoria ultravioleta se han llevado a cabo con 0,1–1,0 mg de material, una cantidad que es normalmente insuficiente para medidas de rotación con la raya D del sodio.

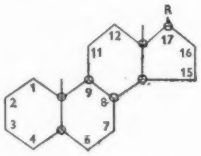
Entre 1812 y 1954 sólo se determinaron experimentalmente unas cincuenta curvas del efecto Cotton [3]; los cromóforos investigados comprendían unas cuantas cetonas, como el alcanfor, cuya curva de dispersión rotatoria era semejante a la curva A de la Fig. 2. Aunque los resultados experimentales obtenidos no condujeron a una aplicación general del método, demostraron, no obstante, que era posible medir el efecto Cotton siempre que se escogiesen sustancias con cromóforos adecuados. Por esta razón, cuando el primer modelo del espectropolarímetro Rudolph llegó a nuestro laboratorio, nos apresuramos a ver si se podía relacionar el efecto Cotton con la estructura.

APLICACIONES ESTEREOQUIMICAS

A pesar de que para establecer correlaciones estereoquímicas [5] las curvas de dispersión rotatoria sencillas son preferibles a una medida única del poder rotatorio con la raya D del sodio, especialmente cuando las curvas cortan la línea cero, sus aplicaciones están claramente limitadas. Por otro lado, si las variaciones en la naturaleza de la asimetría en las inmediaciones de un cromóforo accesible espectrográficamente cambian la forma o el signo de las curvas del efecto Cotton y estos cambios se pudiesen relacionar con determinadas características estructurales o estereoquímicas de la molécula, el resultado constituiría un instrumento de gran valor para el químico orgánico.

Para los experimentos iniciales seleccionamos el grupo cromóforo carbonilo, que absorbe en una región accesible del espectro (2800–3300 Å), con una extinción relativamente baja capaz de permitir determinaciones de poder rotatorio a lo largo de la región de absorción máxima, lo cual es esencial para la determinación del efecto Cotton. Además, trabajos previos [3] con el alcanfor y otras cetonas terpénicas relacionadas habían demostrado que tales cetonas presentan efecto Cotton; es decir, que el grupo cromóforo carbonilo $>C{=}O$, que es intrínsecamente simétrico, adquiere actividad óptica cuando se coloca en un medio asimétrico, aunque no se podía predecir de estos estudios si el efecto Cotton reflejaría los cambios estructurales en los grupos asimétricos circundantes. Otra razón para escoger el cromóforo carbonilo era la abundancia natural de muchos aldehidos y cetonas ópticamente activos, o de los alcoholes a partir de los cuales se podían obtener por oxidación.

Una vez escogido el cromóforo — es decir, el componente responsable de la absorción en la dispersión rotatoria — fue necesario decidirse por una estructura asimétrica adecuada que ofreciese suficientes posibilidades de alteración selectiva para poder ver si tales cambios producían variaciones en la forma o en el signo de la curva del efecto Cotton. A este fin, elegimos un grupo con propiedades únicas: los esteroides, caracterizados por el esqueleto:



Las ventajas de este grupo son múltiples. Todos los esteroides son ópticamente activos, su configuración absoluta es conocida y normalmente poseen una conformación fija y definida. Además, durante los últimos treinta años se han preparado varios millares de representantes de este grupo. Finalmente — y quizás éste sea el punto más importante para nuestros propósitos — la mayoría de los esteroides poseen una cadena con siete átomos de carbono asimétricos contiguos (indicados con un círculo) de manera que dondequiera que se coloque el grupo carbonilo en esta molécula, no puede estar separado por más de un átomo de carbono de dicha cadena asimétrica. Si se coloca el grupo carbonilo en cada una de las once posiciones posibles del esqueleto tetracíclico, el cromóforo se encontrará en posiciones asimétricas diferentes. La incorporación de un átomo de carbono trigonal en cualquiera de los anillos originará un desplazamiento de los ángulos de valencia con la consiguiente distorsión de la geometría del anillo, que podrá notarse hasta distancias variables de esta columna vertebral asimétrica. Como en nuestro laboratorio poseíamos muchos de estos esteroides, así como un espectropolarímetro moderno, pudimos medir las curvas de dispersión rotatoria de varios centenares de cetonas estrechamente relacionadas. Este trabajo inicial [6] demostró que las variaciones en la forma y el signo de las curvas se pueden relacionar con muchos parámetros moleculares importantes. Esto nos movió a llevar a cabo una investigación mucho más extensa de lo que habíamos planeado inicialmente acerca de la aplicación de las medidas de dispersión rotatoria a

la química orgánica. Buena parte de este trabajo se publicó entre 1955 y 1960 en unos cuarenta artículos salidos de nuestro laboratorio y ha sido resumido en un libro [2] por el autor. Por esta razón solo se mencionarán aquí los puntos más salientes a fin de indicar el alcance del método y la dirección de las futuras investigaciones.

La Fig. 3 muestra un ejemplo típico de la información estructural que se puede deducir de las curvas de dispersión rotatoria. En la figura están representadas las curvas de dispersión de tres colestanonas isómeras que sólo se distinguen por la posición del grupo carbonilo; esas curvas difieren marcadamente en forma o en signo. Un hecho importante es que esas curvas características se mantienen en presencia de otros muchos sustituyentes, tales como ésteres, ácidos, alcoholes y lactonas, los cuales no absorben en el mismo intervalo espectral que el carbonilo. Por tanto, esto nos proporciona un método que, utilizando menos de 1 mg de sustancia recuperable, puede indicarnos muchas veces la posición en un esteroide desconocido de un grupo ceto y de aquí la de la correspondiente función hidroxi. En la actualidad no se conoce ningún otro método que suministre tal información.

Las diferencias en las curvas de dispersión rotatoria de la Fig. 3 se consiguieron desplazando el grupo carbonilo a lo largo de la estructura asimétrica y colocándolo cada vez en una posición de asimetría distinta; estos cambios se reflejan en las curvas de dispersión. Alternativamente, se puede producir un cambio parecido manteniendo el cromóforo en la misma posición y alterando la estereoquímica de las inmediaciones. Así, por reducción del doble enlace de la hormona sexual masculina se obtienen dos isómeros, la 5α- y la 5β-androstan-17β-ol-3-ona que difieren únicamente en la naturaleza de la unión entre los anillos A y B. Como puede verse en la Fig. 4, el isómero 5α exhibe efecto Cotton positivo (A) y el isómero 5β, negativo (B). Estas características de las curvas de dispersión rotatoria se mantienen incluso cuando en esas moléculas los sustituyentes en C-5 ó C-10, o ambos, son reemplazados por grupos no cromóforos como el CH_2OH, el CN o el CO_2CH_3; esto ha resultado muy útil para determinar la naturaleza de la unión entre los anillos A y B en un 3-ceto-esteroide desconocido.

Cuando el grupo carbonilo ocupa una posición contigua a la unión entre los anillos, en presencia de ácidos o bases se puede alcanzar el equilibrio entre los dos isómeros. Esto puede verse (Fig. 5) con las dos 15-cetonas de la serie de los ácidos

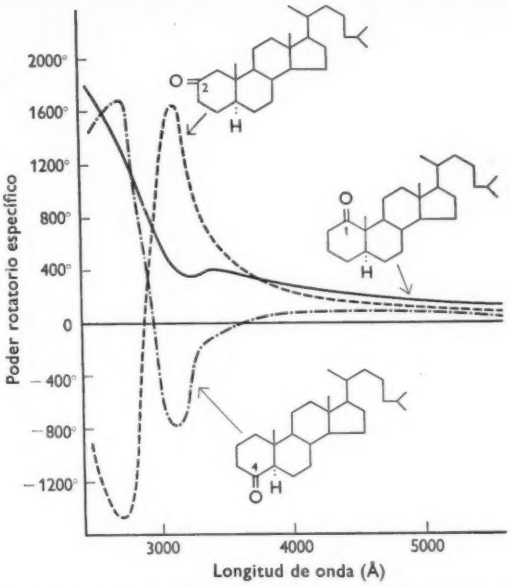


FIGURA 3 – *Curvas de dispersión rotatoria óptica de varias colestanonas isómeras.*

biliares, que sólo difieren en la configuración en C-14. El isómero *cis* en C/D (B), con un efecto Cotton negativo, es el isómero más estable; la cinética de la isomerización puede seguirse con facilidad en microescala utilizando los datos de la Fig. 5 [7]. Debe observarse que mientras el poder rotatorio específico de los dos isómeros para la raya D del sodio (5890 Å) es muy parecido, su diferencia en el ultravioleta cerca de los 3200 Å es de unos 3000°. Por tanto, sólo se necesita medir la velocidad con que cambia el poder rotatorio para una longitud de onda conveniente en el ultravioleta para calcular de estos datos la cinética y la posición de equilibrio.

Las curvas de dispersión rotatoria representadas en las Figs. 3–5 son ejemplos típicos de las aplicaciones de las medidas de dispersión rotatoria al estudio de problemas estructurales, estereoquímicos y analítico-cinéticos en la serie de los esteroides. Esta generalización obtenida en el grupo de los esteroides es de aplicación mucho más amplia, como se demostró [8] por un proceso de disección, por medio del cual se vio que las características de las gráficas de dispersión rotatoria se deben exclusivamente a la asimetría especial de los dos anillos que constituyen las inmediaciones del grupo carbonilo. Esta conclusión condujo inmediatamente a las dos aplicaciones más importantes de la dispersión rotatoria: la atribución de configuraciones absolutas y la detección de alteraciones de conformación.

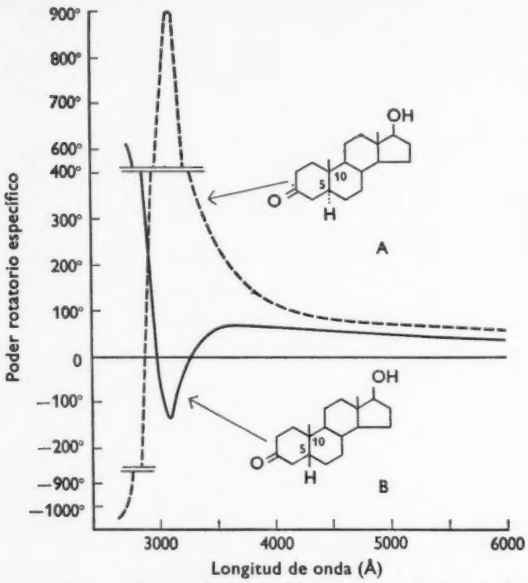


FIGURA 4 – *Curvas de dispersión rotatoria óptica de la 5α-androstan-17β-ol-3-ona (dihidrotestosterona) (A) y de la 5β-androstan-17β-ol-3-ona (B).*

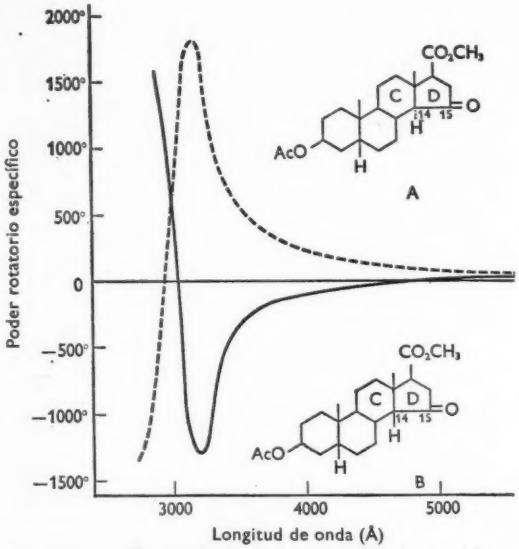


FIGURA 5 – *Curvas de dispersión rotatoria óptica del 3β-acetoxi-15-oxoetianato de metilo (A) y del 3β-acetoxi-15-oxo-14β-etianato de metilo (B).*

APLICACIONES EN EL ANALISIS DE CONFORMACIONES

El empleo de este método en el análisis de conformaciones viene ilustrado en la Fig. 6. La *trans*-10-metil-2-decalona (I) es el análogo bicíclico del esteroide 5α-3-ceto (A en Fig. 4), y su conformación puede definirse sin ambigüedad como la forma IA «omnisilla» (Fig. 6). La curva de dispersión rotatoria de esta cetona I resultó ser prácticamente idéntica a la del esteroide A de la Fig. 4. La *cis*-10-metil-2-decalona (II en Fig. 6) constituye un problema mucho más difícil, puesto que se han de considerar dos configuraciones (IIA y IIB) omnisillas. La forma IIA se denomina conformación esteroide, puesto que los esteroides debido a la fusión de los otros dos anillos sólo poseen esta conformación. Habíamos establecido previamente [8] que los anillos más distantes de los esteroides no afectan apreciablemente la forma de la curva de dispersión rotatoria de una cetona dada, por tanto el efecto Cotton negativo del esteroide B en la Fig. 4 puede tomarse como curva de referencia adecuada para la conformación esteroide de la cetona bicíclica II en la conformación IIA (Fig. 6). Se ve que en la conformación no esteroide IIB, la asimetría del medio que rodea al grupo carbonilo es distinta y, por tanto, debe esperarse que su curva de dispersión rotatoria sea también completamente distinta de la del modelo esteroide. Cuando II fue sintetizada [8] en forma ópticamente activa y se midió su curva de dispersión, ésta resultó ser extraordinariamente parecida a la del esteroide B de la Fig. 4. Se deduce por tanto que la cetona II posee la conformación esteroide IIA, una conclusión que no es fácil de deducir de consideraciones puramente estéricas. Hasta ahora, la dispersión rotatoria ha sido el único método físico que ha conseguido arrojar luz sobre la conformación de esta decalona en solución.

DETERMINACION DE LA CONFIGURACION ABSOLUTA

La determinación de la configuración absoluta, o sea la diferenciación entre dos representaciones que son imagen especular la una de la otra, ha despertado interés desde los comienzos de la estereoquímica. El único procedimiento directo es el análisis por rayos X [9], pero hasta el presente sólo se ha empleado en contados casos. Lo que en realidad se necesita es un método rápido que permita establecer la configuración absoluta de una molécula dada por su relación con otro compuesto de referencia cuya configuración absoluta se haya fijado directa o indirectamente (después de una transformación química) por medio de rayos X. Las medidas de dispersión rotatoria satisfacen tan importante necesidad.

En principio, el procedimiento es bastante

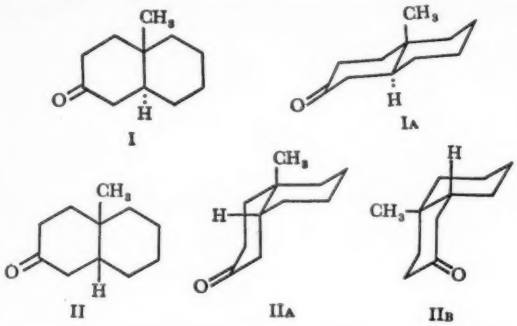


FIGURA 6 – *Representación de la conformación de la* trans-10-*metil*-2-*decalona* (I) *y de la* cis-10-*metil*-2-*decalona* (II).

sencillo [8] y está basado en las mismas premisas empleadas para el examen de la conformación de la *cis*-10-metil-2-decalona. Ya hemos dicho que la forma característica de la curva de dispersión rotatoria viene determinada por la estereoquímica de los dos anillos y la conformación de la región que rodea el cromóforo, en este caso el grupo carbonilo. Como los sustituyentes no cromofóricos no interfieren, sólo se necesita, pues, comparar la curva de dispersión rotatoria del compuesto desconocido con la de una sustancia de referencia conocida que contenga el mismo cromóforo en un medio circundante parecido.

La configuración absoluta de los esteroides es conocida [10]; por consiguiente, sus curvas de dispersión rotatoria se pueden utilizar como referencia. En la Fig. 7 se reproduce un ejemplo típico que muestra las curvas de dispersión rotatoria del esteroide $\triangle^4$-colesten-3-ona (I) y del sesquiterpeno carisona (II). El sustituyente hidroxiisopropil en C-7 de la carisona no es cromofórico, lo mismo que el grupo metilo extra en C-4. Este segundo hecho se comprobó [8] mediante un experimento independiente en el que se estableció que ninguno de los detalles esenciales de la curva de dispersión rotatoria de la $\triangle^4$-colesten-3-ona (I) se alteraba por adición de un grupo metilo en C-4. Por tanto, el cromóforo carbonilo en el esteroide I cuya configuración absoluta se conoce y en el sesquiterpeno carisona se encuentra en un medio bicíclico circundante idéntico. Como sus curvas de dispersión rotatoria son muy parecidas en forma y signo, la configuración absoluta de la carisona es la representada por la fórmula II y no su imagen especular. La tercera sustancia de la Fig. 7, la cetona tricíclica III, tiene en los anillos A y B la misma distribución estereoquímica relativa que el esteroide I. En cambio, su curva de dispersión rotatoria es prácticamente la imagen especular de la del esteroide, de lo que resulta que en lo que se refiere a su configuración absoluta, la cetona III pertenece a la serie antípoda.

Recientemente, se han introducido diversas mejoras en este procedimiento, incluyendo generalizaciones semiempíricas que permiten predecir el signo del efecto Cotton de una cetona sin necesidad de referirla a la curva de dispersión rotatoria de un compuesto de referencia. Estas generalizaciones se han reseñado en otro lugar [11]. Es suficiente mencionar que por medio del procedimiento ilustrado en la Fig. 7, o por extensión de este procedimiento [11], se ha establecido con facilidad la configuración absoluta de una gran variedad de productos naturales muy complicados. A continuación se citan varios ejemplos típicos; es evidente que cualquiera de los métodos clásicos hubiera requerido un esfuerzo mucho mayor para llegar a las mismas conclusiones.

Hasta aquí la discusión se ha limitado prácticamente al cromóforo carbonilo. Recientemente, nuestra atención y la de otros investigadores se ha extendido a otros cromóforos, habiéndose conseguido ya considerables progresos. Ejemplos recientes son los ditiocarbamatos y xantatos [12], los disulfuros y diseleniuros [13], las ftalimidas [14], las aciltioureas [15] y los osmiatos [16]. La

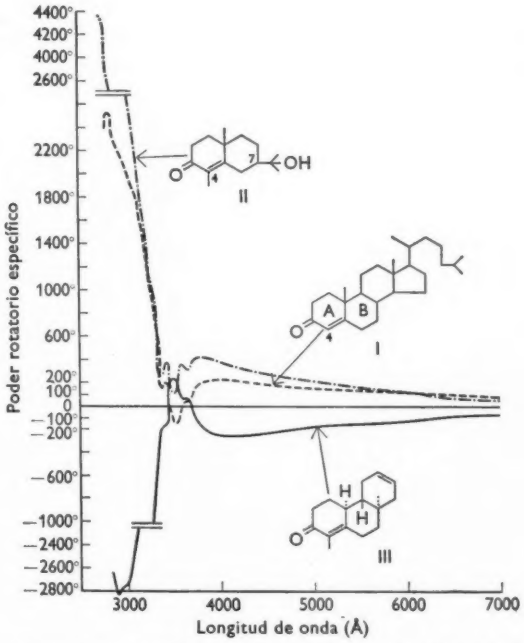
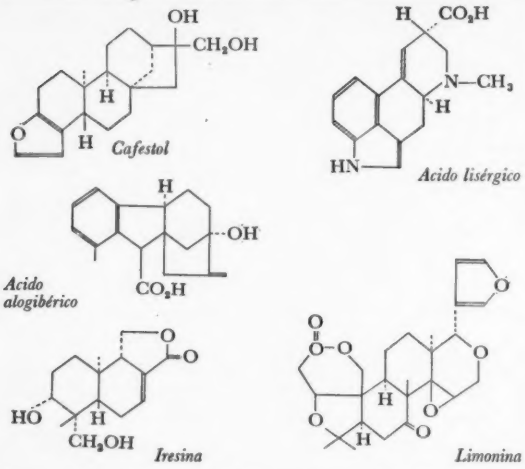


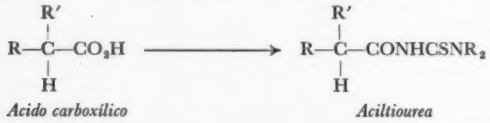
FIGURA 7 – *Curvas de dispersión rotatoria óptica de la* Δ^4-*colesten*-3-*ona* (I), *de la carisona* (II) *y del* (—)-1,14-*dimetil*-2-*oxo*-$\Delta^{1(11),6}$-*decahidrofenantreno* (III).



importancia de esta lista parcial reside no sólo en el amplio campo de los cromóforos que dan curvas del efecto Cotton, sino en el hecho aun más significativo de que comprende derivados de grupos funcionales no cromofóricos.

Por ejemplo, los α-aminoácidos no absorben en la región adecuada del ultravioleta y por consiguiente sólo originan curvas de dispersión rotatoria sencillas; en cambio, sus N-ditiocarbalcoxi-derivados, los ditiocarbamatos, fáciles de preparar, presentan un fuerte efecto Cotton, y el signo del efecto Cotton se puede relacionar directamente [12] con la configuración absoluta del centro de asimetría, puesto que los miembros de la serie L- presentan efecto Cotton positivo y los de la serie D-, negativo.

Análogamente, los ácidos carboxílicos no absorben por encima de los 2100 Å, pero las aciltioureas derivadas [15] presentan un máximo de absorción de intensidad baja cerca de los 3400 Å. Por tanto, no es de extrañar que estos derivados den curvas del efecto Cotton cuyo signo se puede utilizar para deducir la configuración absoluta del centro de asimetría en α del ácido carboxílico original.



Las olefinas son prácticamente transparentes por encima de los 2000 Å, pero reaccionan con facilidad con el tetraóxido de osmio formando ésteres ósmicos. Se ha visto [16] que estos ésteres y en especial sus complejos dipiridílicos producen un efecto Cotton acusado en una zona muy conveniente del espectro. Como estos osmiatos se pueden preparar en microescala, proporcionan un medio para estudiar ciertas características estructurales y estereoquímicas de las olefinas en función de curvas de dispersión rotatoria óptica anómalas.

CONFORMACION DE POLIPEPTIDOS Y PROTEINAS

Una aplicación muy interesante de la dispersión óptica rotatoria que no se ha mencionado todavía es la determinación de la conformación de los polipéptidos y las proteínas. E. R. Blout [17] la ha descrito recientemente con gran detalle y sólo vamos a mencionarla brevemente. En la actualidad está completamente generalizada la aceptación de la estructura helicoidal-α con puentes de hidrógeno para las proteínas, propuesta originalmente por L. Pauling y R. B. Corey. Uno de los métodos más efectivos para el estudio de estas características de conformación ha sido la dispersión rotatoria, aunque hasta hace poco tiempo las curvas estudiadas

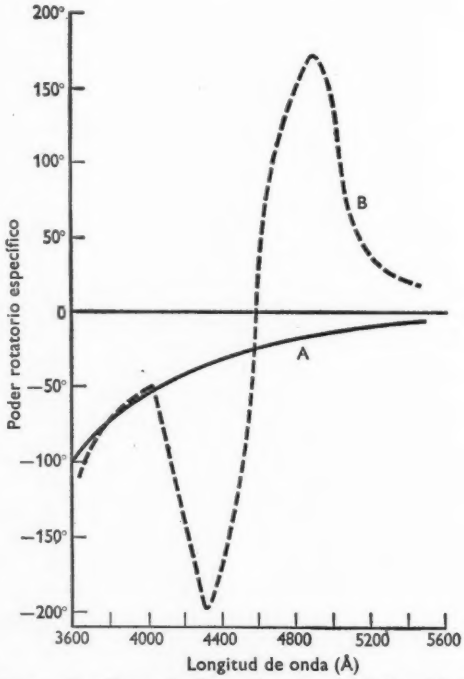


FIGURA 8 – *Curva de dispersión rotatoria óptica del ácido poli-α-L-glutámico a pH 4,9. Curva A, polipéptido sin colorante; curva B, complejo polipéptido-acriflavina (tomado con autorización de Blout, E. R. y Styrer, L.* [19]).

eran del tipo sencillo. Concretamente, se observó que las curvas sencillas de los polipéptidos en una conformación desordenada obedecía a una sencilla ecuación de Drude (relación entre el poder rotatorio óptico y la longitud de onda fuera de la región de una banda de absorción ópticamente activa) pero que esto no ocurre para la conformación helicoidal. La consiguiente generalización matemática, debida principalmente a W. Moffitt, ha resultado muy útil. M. Goodman y sus colaboradores [18] han demostrado por medio de medidas de dispersión rotatoria que el intervalo crítico en que los polipéptidos sintéticos del ácido γ-metilglutámico pasan de la estructura desordenada a la helicoidal está entre el hepta y el nonapéptido.

Dos observaciones recientes de gran importancia [19, 20] debidas a Blout y sus colaboradores indican que la dispersión rotatoria óptica anómala y la determinación del efecto Cotton van a desempeñar un papel de importancia creciente en el campo de los polipéptidos y proteínas. En el primer trabajo [19] se hizo notar que mientras el ácido poli-α-L-glutámico da una curva de dispersión rotatoria sencilla (A en la Fig. 8), su complejo con el colorante ópticamente inactivo acriflavina produce un efecto Cotton (B en Fig. 8) con centro en la banda de absorción del colorante, situada hacia los 4570 Å. Este efecto Cotton sólo se observa cuando el polipéptido en el complejo colorante-polipéptido posee la conformación helicoidal pero no cuando tiene la desordenada. De esta forma, los complejos ofrecen un procedimiento extraordinariamente sencillo para el estudio de conformaciones helicoidales y para la determinación de la dirección de giro de la hélice. De aplicación aún más general es la observación [20] de que el efecto Cotton de los polipéptidos y proteínas se puede determinar directamente en la zona 2100–2300 Å mediante el nuevo espectropolarímetro Rudolph de registro automático.

REFERENCIAS

[1] BIOT, J. B. *Mém. Inst.*, **1**, 1, 1812; *Mém. prés. Acad. Sci., Paris*, **2**, 41, 1817.

[2] DJERASSI, C. «Optical Rotatory Dispersion: Applications to Organic Chemistry». McGraw-Hill, Nueva York. 1960.

[3] LOWRY, T. H. «Optical Rotatory Power». Longmans, Green & Co., Londres. 1935.
LEVENE, P. A. y ROTHEN, A., en H. GILMAN, «Organic Chemistry», Vol. II, Cap. 21. John Wiley & Sons, Nueva York. 1938.
KUHN, W. *Ann. Rev. Phys. Chem.*, **9**, 417, 1958.

[4] Véase el capítulo 2 en [2] y DJERASSI, C. y KLYNE, W., *Proc. Chem. Soc., Lond.*, 55, 1957.

[5] Véase el capítulo 16 en [2].
JONES, P. M. y KLYNE, W. *J. Chem. Soc.*, 871, 1960.
SJÖBERG, B. *Ark. Kemi*, **15**, 451, 1960.

[6] DJERASSI, C. y colaboradores. *J. Amer. chem. Soc.*, **77**, 4354, 4359, 4364, 1955; *Ibid.*, **78**, 440, 3163, 3761, 1956.

[7] ALLINGER, N. L., HERMANN, R. B. y DJERASSI, C. *J. org. Chem.*, **25**, 922, 1960.

[8] DJERASSI, C., RINIKER, R. y RINIKER, B. *J. Amer. chem. Soc.*, **78**, 6362, 1956.
DJERASSI, C. y MARSHALL, D. *Ibid.*, **80**, 3986, 1958.

[9] BIJVOET, J. M. *Endeavour*, **14**, 71, 1955.

[10] FIESER, L. F. y FIESER, M. «Steroids». Reinhold Publishing Corporation, Nueva York. 1959.

[11] Véanse los capítulos 9, 10 y 13 en [2].

[12] SJÖBERG, B., FREDGA, A. y DJERASSI, C. *J. Amer. chem. Soc.*, **81**, 5002, 1959.

[13] DJERASSI, C., FREDGA, A. y SJÖBERG, B. *Acta chem. Scand.* (En prensa.)

[14] BREWSTER, J. H. y OSMAN, S. F. *J. Amer. chem. Soc.*, **82**, 5754, 1960.

[15] DJERASSI, C. y UNDHEIM, K. *Ibid.*, **82**, 5755, 1960.

[16] BUNNENBERG, E. y DJERASSI, C. *J. Amer. chem. Soc.*, **82**, 5953, 1960.

[17] BLOUT, E. R. Cap. 17 en [2].

[18] GOODMAN, M., SCHMITT, E. E. y YPHANTIS, D. *J. Amer. chem. Soc.*, **82**, 3483, 1960.

[19] BLOUT, E. R. y STRYER, L. *Proc. Nat. Acad. Sci., Wash.*, **45**, 1591, 1959.

[20] SIMMONS, N. S. y BLOUT, E. R. *Biophys. J.*, **1**, 55, 1960.
SIMMONS, N. S., COHEN, C., SZENT-GYÖRGYI, A. G., WETLAUFER, D. B. y BLOUT, E. R. (Observaciones no publicadas.)

El nucleolo del núcleo celular

J. L. SIRLIN

El nucleolo, orgánulo contenido en el nucleo celular, fue descrito por Fontana hace ya unos dos siglos. Pero hasta hace poco tiempo su carácter era todavía oscuro. En rigor, aún no se sabe exactemente cómo cumple su función en la célula, aunque hoy no hay ya duda sobre su participación en la síntesis de proteínas. El presente artículo describe las teorías actuales sobre la función bioquímica del nucleolo.

«On observe un corps oviforme, ayant une tache dans son milieu», estas son las palabras de Fontana en 1781 [1] cuando describe células de mucus de anguila, con la más antigua alusión al nucleolo que se conoce. El núcleo («cuerpo oviforme» de Fontana) había sido ya descrito por Leeuwenhoek en 1702. La mayoría de los núcleos celulares contienen nucleolos [2]. Suelen ser cuerpos redondeados, en número de uno o varios por núcleo, más densos que la cromatina en que están incluídos; su densidad se debe al elevado contenido de proteína. La función del nucleolo es de tal sutileza que no fue descrita en términos químicos hasta pasado el año 1940. Fue preciso que las escuelas de Caspersson en Suecia y de Brachet en Bélgica arrojaran luz sobre la química celular del ácido ribonucleico y proteínas. Los detalles de la función química del nucleolo siguen oscuros.

El ácido ribonucleico (ARN) constituye la más característica sustancia del nucleolo. Este posee además lípidos, carbohidratos y sustancias minerales. Carece de ácido desoxirribonucleico (ADN), la más característica sustancia de los cromosomas. En la mayoría de las preparaciones citológicas se ve rodeado de cromatina condensada (cromosomas distendidos) formando la cromatina asociada al nucleolo. Algunos autores opinan que este material pertenece al nucleolo, y de aquí la afirmación frecuente de que el nucleolo contiene ADN. A veces la cromatina de asociación del nucleolo es del tipo denominado heterocromatina.

El nucleolo sufre ciertos movimientos dentro del núcleo, bien pasivos debidos a la consistencia semilíquida de la cromatina, o bien activos, que se traducen en la emisión de prolongaciones, en movimientos ameboideos, fusión con otros nucleolos y membrana nuclear, e incluso fragmentación. El movimiento activo es el más importante. La relativa plasticidad determina a veces formas muy extrañas, nada parecidas al vulgar aspecto globoso, como en ciertas células nutricias y en ciliados. Los movimientos suelen acentuarse en períodos de intensa síntesis celular.

La mutua fusión de nucleolos explica que el número de éstos no sea constante ni pueda tomarse como índice de actividad para cada tipo de célula. El número de nucleolos tiende a decrecer con la edad de las células, excepto en gemmaciones ocasionales; en oocitos, células nutricias y algunos otros tipos celulares transicionales, la tendencia es a aumentar gradualmente. El número máximo de nucleolos es un carácter fijado por los organizadores nucleolares, que son segmentos diferenciados de ciertos cromosomas y por tanto de número fijo [3]. Se comprende, pues, que el número máximo de nucleolos represente un índice real del grado de ploidía. Dicho número máximo se encuentra en células jóvenes antes de que ocurran fusiones [4].

Dijimos que la función química del nucleolo no se conoce todavía en sus detalles. Sin embargo, el hecho de que célula y nucleolo sincronizan sus actividades se supo enseguida, resultando muy pronto evidente la participación de éste en el quimismo celular, y, sobre todo, en la síntesis de proteínas. Cuando hay intensa síntesis el nucleolo tiende a ser único y grande. Esto se observa bien en células secretoras de enzimas y mucus, en neuronas que elaboran sustancia de Nissl (una ribonucleoproteína), y en células embrionarias o regenerantes en plena producción de proteínas. Además, el desarrollo de los nucleolos tiene relación con el nivel nutricio de la célula. En cambio, los nucleolos de células tumorales carecen de rasgos típicos, y, aunque existe leve correlación entre aspecto de núcleos y formaciones malignas, el aspecto no es bastante específico como para ser diagnóstico. A pesar de ello, algunos autores siguen creyendo que el crecimiento maligno está iniciado por estimulación específica del nucleolo.

Las células que como los leucocitos y las fibras musculares adultos no mantienen activa síntesis proteica poseen nucleolos inconspicuos. Similarmente, los nucleolos desaparecen en fases de la

vida celular cuando cesa la síntesis, tales como la división celular (las proteínas del huso son sintetizadas antes) y la segmentación embrionaria (momento en que hay multiplicación celular sin producción de proteína). Los nucleolos sólo reaparecen en el embrión durante la gastrulación, al consumirse las proteínas maternas del vitelo y reactivarse la síntesis proteica. Son excepciones los embriones de mamíferos, moluscos y anélidos, cuyas células tienen nucleolos bien desarrollados desde el principio. No se sabe si ello se debe a funciones especiales de estos nucleolos, aunque así parece sugerirlo el especial modo de desarrollo embriónico en esos animales, placentario en los mamíferos y espiral en los otros. Hay una correlación general, pero no completa, entre la síntesis proteica activa en las células y el que éstas tengan vigorosos nucleolos. Son excepciones las celulas hepáticas y ciertas células tumorales en degeneración. En las células hepáticas, los grandes nucleolos quizás sean desarrollos abortivos compensadores del sistema próteo-sintético, o acaso la mera preparación frente a ulteriores necesidades de síntesis, como se ha supuesto en las neuronas.

Los nucleolos suelen ser dañados por los mismos agentes que retardan el metabolismo celular, un nuevo indicio en favor de su admitida función metabólica, como lo es, asimismo, el que en condiciones celulares patológicas se suelen notar cambios en los nucleolos.

Se ha dicho con frecuencia que oocitos y células cancerosas producen sustancia nucleolar perceptible al microscopio, pero el significado de este hecho no está claro, ni tampoco su generalidad, pues rara vez se ha detectado con el microscopio electrónico. Con éste es fácil observar frecuentemente nucleolos al lado de la membrana nuclear, cercanos al retículo endoplásmico (importante zona sintetizante del citoplasma), aparato de Golgi, mitocondrias, etc. (Figs. 3 y 4). Es lógico suponer que haya cierta transferencia de sustancia nucleolar, siquiera en la escala de moléculas. La asociación del nucleolo con ciertas regiones diferenciadas del citoplasma ocurre a veces por mediación de cromatina condensada alrededor del nucleolo [5], hecho conocido desde hace muchos años y que condujo a ciertas hipótesis de la función nucleolar más abajo estudiadas.

EL ASPECTO DEL NUCLEOLO

Los nucleolos teñidos exhiben vacuolas, inclusiones, filamentos y zonas de desigual pigmentación. Esas heterogeneidades corresponden en parte a meros artefactos, pero en parte tienen una base bioquímica real y reflejan el grado de actividad del nucleolo. Las grandes vacuolas, por ejemplo, caracterizan estados de intensa secreción, o, a veces, fases degenerativas.

El microscopio electrónico revela el nucleolo como una matriz filamentosa fina, al parecer de naturaleza proteínica, que contiene numerosas particulas más densas, de unos 150 Å (Fig. 4). Son similares a las que hay en el núcleo y citoplasma, por lo cual se suponen de ribonucleoproteína. El centro del nucleolo parece más denso que la periferia, sobre todo cuando está fijado con osmio. La densificación interna puede ser debida a que allí la matriz sea más densa, o a que las partículas se aprieten de forma más compacta. Dicho centro corresponde al «nucleonema» de C. Estable y R. J. Sotelo, y la periferia a su *pars amorpha* [6]. El organizador cromosomal del nucleolo suele permanecer incluído en el nucleolo nacido de él. El aspecto de la ultraestructura nucleolar depende mucho de las técnicas empleadas (fijación, inclusión, etc.), cosa lógica en este orden de magnitud estructural; pero no hay duda de que mucha de la variación observada refleja cambios fisiológicos.

En algunos casos la diferenciación del nucleolo es paralela a la de la propia célula. Así en los oocitos, a veces con nucleolos muy desarrollados, y en ciertas células especiales de las glándulas salivares de lavas de insectos. Se ha llegado a decir [7] que los nucleolos, en conjunto, tienen más que ver con los procesos diferenciativos que los propios cromosomas, o, lo que vendría a ser igual, que el nucleolo es la sede de la herencia celular general (herencia citoplásmica), en tanto que los genes de los cromosomas determinarían sus rasgos particulares [8]. Esto se relaciona con la hipótesis de las «ontomutaciones», de A. M. Dalcq, mutaciones que, alterando profundamente la herencia celular, darían lugar a importantes cambios en el desarrollo embriológico [9]. En efecto, Dalcq hizo hincapié sobre la posible relación entre la presencia de nucleolos en el embrión precoz de mamífero y su desarrollo placental. Sin embargo, se conocen embriones que alcanzan gran desarrollo (aunque no completen su ontogenia) incluso cuando carecen absolutamente de nucleolos organizados. Más adelante volveremos sobre las consecuencias de tal fenómeno.

Lo mejor es considerar a cada nucleolo como un locus diferenciado de un cromosoma particular. Esto es así, sobre todo, en los cromosomas gigantes (politénicos) de dípteros, aunque la situación no debe ser tan sencilla en los cromosomas ordinarios.

Existen otros orgánulos cromosómicos tales como bulbos (*puffs*) y anillos balbiánicos que, aunque diferentes en algunos respectos de los nucleolos, poseen características fisiológicas y morfológicas similares a éstos. Además, si bien faltan nucleolos organizados en los núcleos salivares de los quironómidos, en cambio poseen sustancia nucleolar repartida extensamente por los cromosomas. Es posible hablar, en general, de una sustancia nucleolar cuya forma organizada es el nucleolo.

Falta saber si todos los nucleolos — al parecer con funciones similares — tienen el mismo origen. El problema se plantea en el caso de embriones precoces de mamífero, cuyos nucleolos pueden formarse a partir de orígenes cromosómicos y de otros, y con más razón en el caso de los oocitos de anfibios, donde ciertos nucleolos surgen al parecer en los cromosomas y otros no tienen, con toda certeza, ese mismo origen [10]. Sólo en el caso de postular una sustancia nucleolar general cabe concebir una comunidad de origen. No faltan pruebas que sugieren que exista tal sustancia.

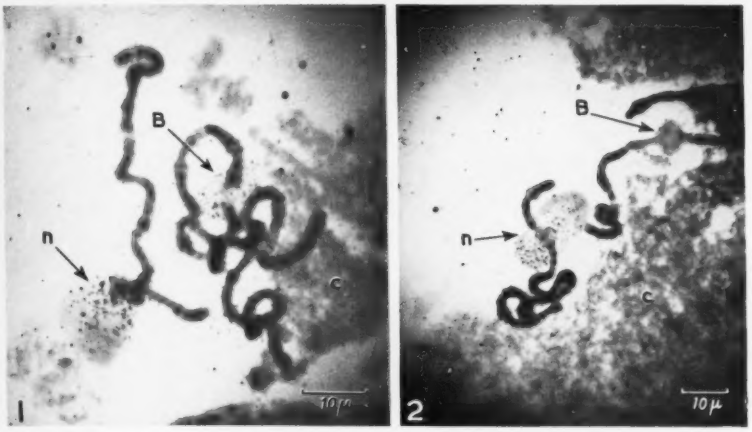
Es aún dudosa la presencia de nucleolos en bacterias y algas azules. Los protozoos sin duda los poseen. Como los organismos sin nucleolo son también seres muy viables, biológicamente hablando, se plantea el problema — más adelante abordado — de la necesidad y significado del nucleolo en las células mucho más evolucionadas.

En cada división celular el nucleolo desaparece al terminar la profase, y reaparece al final, en la telofase. A veces persiste durante toda la división celular, alojado en el citoplasma, pero aun entonces se forman nuevos nucleolos. Esos nucleolos persistentes son más típicos de vegetales que de animales. Por su relación con otros caracteres morfológicos tienen un limitado valor taxonómico. Múltiples son las explicaciones dadas al hecho de la desaparición de los nucleolos. Quizás ocurra al mismo tiempo que un cambio en las condiciones nucleares necesario para mantener la integridad nucleolar, posiblemente facilitando el acceso al núcleo de enzimas que durante la interfase están limitadas al citoplasma. O quizá las interacciones nucleolo-cromosómicas requieran la periódica renovación y reconstrucción del nucleolo. También se ha sugerido que acaso la repartición del nucleolo entre las dos células hijas sería perturbadora, siendo por ello soslayada mediante la formación de nuevos nucleolos. Es improbable que el nucleolo desaparezca para liberar sustancia nucleolar, ya que se forman también nuevos nucleolos aún cuando los viejos persisten.

La manera de reaparecer el nucleolo durante la telofase permite comprender mejor la naturaleza y significado de la sustancia nucleolar. En los núcleos con cromosomas politénicos el nucleolo es producto del locus cromosómico en el que surge. En núcleos ordinarios el nucleolo se forma en el organizador, pero utiliza materiales nucleares de otra procedencia, al menos en parte. En el segundo caso, ambos microscopios (ordinario y electrónico) permiten ver en forma bastante convincente la presencia en tales núcleos de «cuerpos prenucleolares» que se fraguan entre los cromosomas y se aglomeran en torno al organizador para reconstruir el nucleolo; excepcionalmente faltan los organizadores, y entonces los cuerpos no se aglomeran. Se ignora qué clase de fuerza explica la confluencia de los cuerpos. Hay pruebas genéticas de que la formación del nucleolo está controlada tanto por el organizador como por los loci génicos. También se ha observado cierta competencia por los materiales precursores entre diferentes organizadores que coexisten en un mismo núcleo, o alternativamente una inhibición mutua entre los numerosos organizadores potenciales que a veces se hallan presentes dentro de un mismo núcleo. Así, cuando los organizadores se encuentran en abolsamientos dentro del núcleo, forman nucleolos más pequeños, como si estuvieran privados de los precursores por los organizadores más centralmente situados; éstos forman nucleolos de tamaño normal. Además, después de ser irradiados, se ve que los cromosomas retardados y los micronúcleos de ellos derivados producen una cantidad total de nucleolos mayor que la normal. El equilibrio entre estas interacciones en el interior del núcleo favorece, en circunstancias normales, al organizador predominante, el cual formará el nucleolo. La profusión de nucleolos en oocitos, pronúcleos y protozoos, podría pues explicarse como relajación temporal de esa competencia o como una acción inhibitoria.

LA FUNCION DEL NUCLEOLO

Primeramente se consideró que el nucleolo formaría el núcleo y éste, a su vez, la célula [11]. Hasta hace poco se admitía también que originaría el deutoplasma y la melanina y *Paramecium* a todos los orgánulos [12]. Otras funciones asignadas han sido: fuente de reserva nutritiva celular o nuclear; reservatorio energético del núcleo; contribución del citoplasma a la nutrición del núcleo; reserva de sustancias segregadas en pequeñas cantidades por los cromosomas; y colector de desechos del metabolismo nuclear y citoplásmico.



FIGURAS 1 *y* 2 – *Autorradiogramas que muestran el comienzo de la incorporación de uridina tritiada, que es un precursor del ARN, en el nucleolo (n) y en el anillo de Balbiani (B) en un núcleo de glándula salivar de un quironómido. En el nucleolo la incorporación comienza cerca del organizador cromosomal, pero no dentro de éste, que se encuentra en el centro del nucleolo. Los cromosomas y el citoplasma (c) aún no han comenzado a incorporar el isótopo. (Reproducido con autorización de Butterworths Scientific Publications, Londres.)*

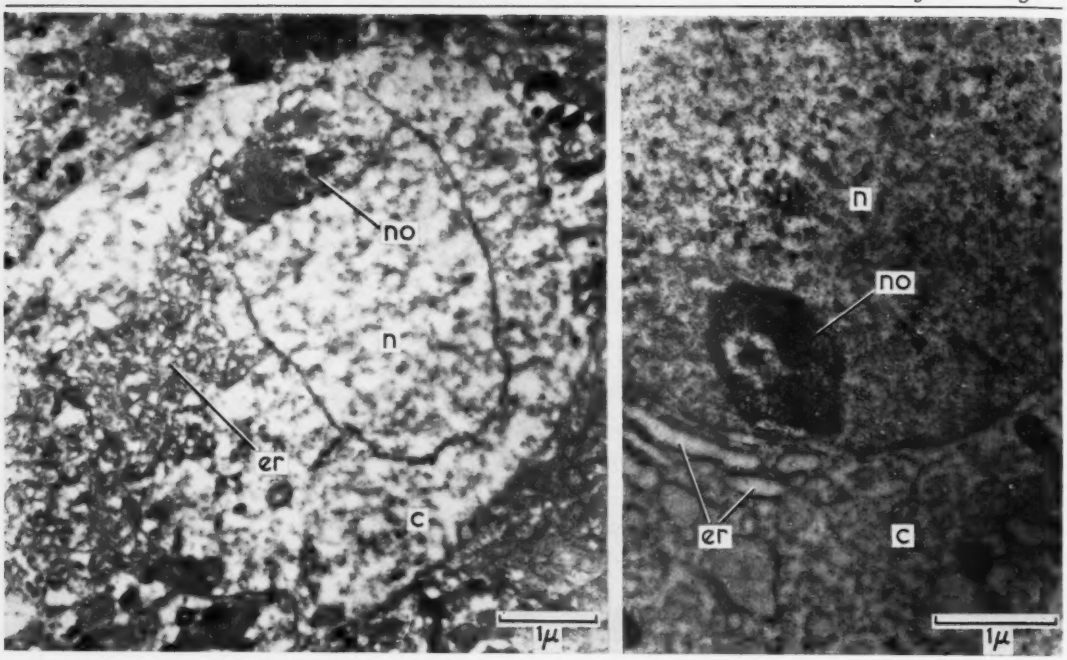
Según la llamada «hipótesis de la matriz» cuando el nucleolo desaparece durante la división, el material nucleolar pasa a depositarse como matriz en los cromosomas para reincorporarse en el nuevo nucleolo durante la telofase. C. D. Darlington [13] señala que el nucleolo y la heterocromatina pueden ser fuentes alternativas de ácido nucleico para los cromosomas. Cierto comportamiento del complejo nucleolar en neuronas y células glandulares, cuando establece contacto con la membrana nuclear por mediación de la cromatina asociada al nucleolo, hizo pensar que la sustancia nucleolar sea descargada en el citoplasma.

Dos teorías recientes muy sugestivas han sido propuestas por Caspersson y colaboradores [5], y por Estable y Sotelo [6]. Cree Caspersson que la estimulación de la cromatina asociada al nucleolo produciría proteínas básicas que se acumularían en éste y pasarían después al citoplasma, donde tendría lugar la síntesis de proteínas celulares específicas. El ARN actuaría tanto en el complejo nucleolar como en el citoplasma, gobernando el complejo del sistema celular para las síntesis proteicas. Según tal teoría, este mecanismo quedaría desorganizado en células cancerosas, donde actuaría con intensidad excesiva. La teoría de Caspersson podría ponerse al día sólo con atribuir al ARN y a la cromatina como un todo la función postulada para las proteínas básicas y la cromatina asociada al nucleolo. Recientemente Caspersson ha considerado el paso del ARN nuclear al citoplasma.

Estable y Sotelo conciben el nucleolo formado por dos componentes de distinto significado. Uno, el nucleonema, que se deposita en los cromosomas durante la división y revierte al nuevo nucleolo postdivisional; este nucleonema poseería continuidad genética (*omnis nucleonema e nucleonema*). El segundo componente sería la *pars amorpha*, de índole plástica, que desaparecería durante la mitosis y se formaría de nuevo en la telofase; la *pars amorpha* constituiría el componente metabólico de cada fase funcional del nucleolo durante la interfase. Con ser sumamente atractiva y conservar algunos elementos de la de la «matriz», esta teoría se compagina peor que la de Caspersson con los hechos conocidos. Faltan pruebas convincentes de que el nucleonema se deposite en los cromosomas en división, aunque es cierto que tal prueba es muy difícil de conseguir. Más grave es la objeción de J. A. Serra [14], quien, basado en sus propias observaciones, cree que la función del nucleonema sea epigenética más que genética.

Sin pretender establecer una teoría sistemática, nosotros vamos a presentar aquí ciertas ideas que pudieran servir a ulteriores hipótesis de trabajo sobre la posible función bioquímica del nucleolo. Postulamos que el nucleolo desempeña en las células de los organismos superiores una función general indispensable a la larga para aquellas células productoras de proteínas, pero que es esencialmente auxiliar.

La supuesta función general se infiere de que el locus nucleolar del cromosoma (el organizador) es idéntico en todos los núcleos de un organismo, y también de la equivalencia funcional de nucleolos, como se demuestra en los cruzamientos híbridos interespecíficos. Que el nucleolo es indispensable para la síntesis de proteínas es suposición basada en que aquél está generalmente presente cuando la célula se halla en proteosíntesis; en que constituye una entidad, sin membrana, inserta en el código genético (el núcleo celular); en su actividad metabólica, de la que hay importantes pruebas



FIGURAS 3 y 4 – *Micrografías electrónicas de una célula en cono del ojo de una larva de insecto (Fig. 3) y de una célula notocórdica de un embrión de anfibio (Fig. 4) mostrando el núcleo (n) y el nucleolo (no). Este parece estar relacionado con el retículo endoplásmico en desarrollo (er) en el citoplasma (c). (Por cortesía de C. H. Waddington y M. M. Perry.)*

indirectas; y por su producción de ARN, sustancia que se sabe participa en la proteosíntesis. En cuanto al carácter auxiliar de su función, se deduce de lo siguiente: 1°, la diferenciación embrionaria, que implica síntesis de proteína específica, transcurre en cierto grado en ausencia de nucleolos organizados y de organizadores; 2°, las células que no sintetizan proteínas y los embriones en segmentación (ambos con «metabolismo de manutención», por así decir) carecen de nucleolos conspicuos, aunque no dejan de necesitar manutención de enzimas; 3°, en organismos inferiores, en ciertas células de larvas de esciáridos y en células de tumores en plena proliferación celular ocurre síntesis proteica aunque no tienen nucleolos organizados. La misión del nucleolo podría muy bien ser el resultado de tener o bien una sola función en el metabolismo nuclear o una serie compleja de funciones que equivaldría, por ejemplo, a un sistema regulador. En ciertos casos, el nucleolo también puede tener funciones especializadas que no consideramos aquí. Esas funciones pueden resultar de adaptaciones funcionales secundarias y no excluyen por necesidad una función nucleolar más general, la cual estudiaremos en relación con las enzimas, el ARN y las proteínas.

ENZIMAS

La nucleósido-fosforilasa y la DPN-sintetasa, dos enzimas principalmente del núcleo que al parecer cooperan en la síntesis de coenzima están sin duda localizadas en el nucleolo [15] y es por tanto posible que éste actúe como fuente de coenzima para la célula. Se ha supuesto que cuando las mitocondrias y los nucleolos se aproximan a ambos lados de la membrana nuclear, los nucleolos surtirían a las mitocondrias de coenzima. En opinión de Dalcq, el nucleolo produciría adenosín-trifosfatasa en los embriones.

ACIDO RIBONUCLEICO

Probablemente la función más importante del nucleolo es su participación en la producción de ARN en las células. En dicha función el ARN es un producto final o un intermediario para la síntesis de alguna proteina. Pero ello sólo es una faceta de un problema más amplio: el de la provisión o control por el núcleo del ARN necesario al citoplasma para la síntesis de proteína. Hay buenas

pruebas en favor de que el ARN citoplásmico depende del del núcleo y de que la intensidad del metabolismo del ARN nucleolar es, en general, paralela a la del ARN nuclear. Recientes experimentos de irradiación del nucleolo han demostrado que parte del ARN citoplásmico depende del del nucleolo y, en menor grado, del ARN cromosomal [16]. Esto último era de esperar en vista de que el nucleolo contiene una buena proporción pero nunca la totalidad del ARN del núcleo. Es importante señalar que los mismos ensayos demuestran también que una fracción del ARN del citoplasma no depende del ARN del núcleo ni del nucleolo. Dicha fracción puede ser sintetizada *in situ* en el citoplasma en vez de en el núcleo, en el cual se supone sean sintetizados las fracciones citoplásmicas del ARN dependientes del núcleo y del nucleolo. Recientemente se ha visto también que en los oocitos de araña los nucleótidos del ARN nucleolar y citoplásmico son idénticos, y diferentes de los del restante ARN nuclear; este hecho sugiere también cierta correspondencia entre los ARN de los dos primeros [17]. Más adelante discutiremos el significado genético del origen nuclear del ARN citoplásmico.

Parece bien demostrado que por lo menos una parte del ARN nucleolar es sintetizado *in situ* durante la interfase, pues en el nucleolo se encuentran todos los precursores y enzimas necesarios para la síntesis de dicho ácido; también apuntan en dicha dirección los estudios bioquímicos y autorradiográficos. En general, cuanto más diferenciada una célula es, mayor es la tasa de síntesis. Durante la reconstrucción del nucleolo en la telofase, parte del ARN parece ser proporcionado por los cromosomas en forma de los ya citados cuerpos prenucleolares. Una posibilidad digna de atención es que haya continua contribución de ARN cromosómico al ARN nucleolar incluso durante la interfase; la función nucleolar en la interfase y la reconstitución nucleolar en la telofase serían entonces dos aspectos de un mismo proceso. A la vista de todo lo dicho, se saca la impresión de que la producción de ARN es una propiedad de la sustancia nucleolar más bien que, por ejemplo, del organizador, independientemente de que haya coalescido o no, en un nucleolo organizado. Sín embargo, la sede de más activa producción de ARN varía según los diferentes nucleolos y su organización: es central en nucleolos salivares de quironómidos, que permanecen ligados al organizador central (Figs. 1 y 2), pero se extiende por toda la superficie en nucleolos de *Drosophila*, desligados del organizador.

El ARN nucleolar puede estar relacionado con distintos ARN con funciones bioquímicas diferentes, como ARN de transferencia, ribosomal o mensajero. Pero cualquiera que sea la función del ARN nucleolar, el nucleolo podría actuar, *inter alia*, a modo de depósito para dicho ácido. Esto último se infiere del modo de su formación y de los casos en que los nucleolos llegan a sobrecargarse con ARN a causa de haberse alterado las condiciones fisiológicas. Para más detalles, el lector puede consultar la reseña publicada por nosotros [18].

El ARN de transferencia es una forma de bajo peso molecular existente en el jugo celular, cuyo papel consiste en tomar los aminoácidos presentados por enzimas específicas de activación y depositarlos en el ARN ribosomal, donde se sintetizan en proteína. Se cree que el posible origen del ARN de transferencia sea en la descomposición del ARN ribosomal o síntesis en el jugo celular o en el núcleo.

La síntesis nucleolar de ARN de transferencia se ha observado en los dos casos de nucleolos hasta ahora estudiados, el del oocito de estrella de mar [19] y el de la célula salivar de quironómido [18]; es probable que ocurra también en la mayoría de otros nucleolos. El ARN de transferencia se ha diagnosticado por métodos bioquímicos en el oocito, y por incorporación de pseudo-uridina radiactiva (un precursor relativamente específico) en la célula salivar. En esta última el nucleolo parece constituir una importante fuente de ARN de transferencia dentro de la célula.

La síntesis del ARN de transferencia implica una función definida del nucleolo en el sistema celular de proteosíntesis, ya sea en la provisión de dicho ARN en cuanto tal, ya en su empleo para síntesis nucleolar de proteína, o ya para el almacenamiento de aminoácido activado. El ARN de transferencia no actúa como transmisor de información genética, pero en cambio le corresponde una función auxiliar en la proteosíntesis que concuerda bien con la función general también auxiliar atribuída más arriba al nucleolo. Cabe pues que el nucleolo surgiera como una adaptación a la función del ARN de transferencia en la proteosíntesis. Esta función podría ser primordial (en un sentido evolutivo) o haberse desarrollado a partir de sistemas sin ARN de transferencia pero con caminos alternativos, sistemas que hoy coexistirían en la misma célula. El ARN de transferencia existe en organismos inferiores que carecen de núcleos y de nucleolos organizados, pero es curioso que esos organismos nunca alcancen complejidad multicelular.

El ARN de molécula grande de los ribosomas existe en las partículas de ribonucleoproteína que, esparcidas por toda la célula, están relacionadas con la síntesis de proteínas. Desempeña el papel de molde para la fabricación de éstas a base de aminoácidos, aportados éstos por el ARN de transferencia. A tal objeto, el ARN ribosomal pudiera contener alguna información para determinar la sucesión lineal apropiada de los aminoácidos. En principio, esta está «codificada» en los genes y se cree que el ARN ribosomal sea sintetizado en el núcleo bajo control de ellos, y más tarde pase a los sitios citoplásmicos de síntesis donde desempeña su papel de molde. Como el nucleolo mismo representa un gene, el ARN ribosomal también podría sintetizarse directamente en él. Se supone que el ARN mensajero programa los ribosomas y que, por lo tanto, también contiene algunas secuencias informativas; sería sintetizado bajo control génico.

La evaluación de cualquier contribución final del nucleolo al ARN ribosomal sigue siendo muy hipotética, por falta de medios para caracterizarlo químicamente *in situ*. La síntesis de ARN de transferencia en el nucleolo, ya mencionada, no excluye la del ARN ribosomal, pues todos los cuatro principales ribonucleósidos presentes en el nucleolo son comunes a ambos tipos de ARN. El microscopio electrónico revela que las partículas ribosómicas del nucleolo son similares a las del núcleo y citoplasma. Pudiera ser que dichas partículas fueran sintetizadas en el nucleolo para ser remitidas al citoplasma. Serían sintetizadas totalmente allí, o sólo sus fracciones proteínicas; en este último caso su ARN se supone sería sintetizado en algún otro lugar del núcleo. Las pruebas bioquímicas abogan en favor del origen nuclear de toda la partícula. También pudieran ser estas partículas sede nucleolar de síntesis proteica y no estar destinadas a pasar al citoplasma. Asimismo, cabe la coexistencia de dos poblaciones de partículas en el nucleolo, una integrando la maquinaria local de síntesis, y la otra como producto de ésta. Incluso puede concebirse que una determinada partícula despliegue actividad sintética primero en el nucleolo y luego en el citoplasma.

Hoy se admite que el nucleolo ayuda de algún modo en la producción de réplicas de ARN génico que, de otro modo, no sería producido en escala suficiente para surtir las sitios sintéticos del citoplasma, especialmente en momentos de muy activa síntesis proteica, como son los de secreción y diferenciación. El ARN génico se replica a base de moldes maestros depositados en el nucleolo. Esto pudiera tener lugar durante la telofase a través de los cuerpos prenucleolares, al reconstituirse el nucleolo. Esto necesitaría el aflujo de ARN hacia el nucleolo en la interfase, si bien las observaciones autorradiográficas son inconclusivas. Si el ARN ribosomal y mensajero son, como se supone, gene-específicos, se sigue que el nucleolo incorporaría moldes maestros de tantos genes como exija la colaboración nucleolar para la réplica de esos ARNs. También se ha dicho que el ARN nucleolar pudiera combinarse con proteína como reserva, y viceversa.

Son pues necesarios en el nucleolo tres tipos de ARN que actúen de molde para cumplir un papel auxiliar en el sistema de síntesis de proteína:

1. Un molde singular (o a lo más en escaso número) para fabricar un ARN nucleolar general: ARN de transferencia o ribosomal. Puesto que el nucleolo mismo representa un gene (o a lo más algunos), dicho molde puede ser el propio ARN nucleolar, y no el de los cromosomas. Se sabe positivamente que el ARN nucleolar de los cromosomas politénicos es el producto del nucleolo mismo.

2. Un molde para la fabricación de un producto nucleolar general final, tal como la proteína ribosomal. Esta, como en el caso del ARN de transferencia o ribosomal podría ser elaborada por uno o unos moldes formados por el propio ARN nucleolar. Será considerada más adelante.

3. ARNs que sirven de moldes, de origen cromosómico, acumulados en el nucleolo para la réplica de ARN ribosomal o mensajero. Aunque algunos genes requieran el concurso del nucleolo para elaborar esos ARNs, cabe concebir que no lo necesiten todos.

Los cromosomas que parecen más autosuficientes son los cromosomas politénicos de los dípteros, y hay indicaciones de que liberen ampliamente ARN. (Si todos los genes fueran autosuficientes, el ARN que sirve de moldes del tipo 3 sería innecesario). Este punto de vista se basa en el hecho de que generalmente los cromosomas politénicos de esciáridos carecen de nucleolos, pero poseen una sustancia nucleolar muy difusa, lo mismo que ciertas células de mamíferos cultivadas artificialmente que tienen cromosomas ordinarios pero con nucleolos diminutos. Quizá una diferencia importante entre cromosomas ordinarios y cromosomas múltiples resulte del diferente grado de colaboración nucleolar que requieren unos y otros para la replicación de moldes de ARN.

PROTEINAS

Aunque los requisitos para la síntesis de proteínas se dan indistintamente en células jóvenes o maduras el recambio (*turnover*) de aminoácidos es privativa de nucleolos jóvenes. Por contraste, el ARN es recambiado ininterrumpidamente durante toda la vida del nucleolo. El recambio restringido de aminoácidos podría explicarse de varios modos, v.gr. como consecuencia de síntesis proteica neta, y no como mera activación o intercambio. Parte de dicha síntesis pudiera ser de la propia proteína del nucleolo en crecimiento, y parte acaso de proteína exportable, sobre todo desde que recientemente se sabe que el nucleolo aprovecha al menos una parte de proteínas preexistentes para su crecimiento. Está claro que el nucleolo maduro sólo puede controlar proteínas celulares a través de otras previamente sintetizadas durante su período de crecimiento o con la mediación del ARN nucleolar que se sigue produciendo durante la madurez del nucleolo.

Consideraremos tres clases de proteína nucleolar exportable. El mecanismo de replicación para la elaboración de éstas sería el ya postulado más arriba para el ARN.

Varias líneas de evidencia sugieren la posible elaboración nucleolar de proteína ribosomal [18]. Puede ésta combinarse con el ARN ribosomal para dar lugar a la partícula ribosomal *in situ*. Esta es, sin duda, una de las más simples funciones que pueden asignarse al nucleolo considerando su papel auxiliar en el sistema celular para la proteosíntesis, y que podría explicar todo cuanto se sabe acerca del recambio nucleolar de aminoácido y ARN. Presupone que las partículas ribosomales son elaboradas por el nucleolo sólo mientras éste crece.

Todavía pueden mencionarse otras proteínas. En ciertos oocitos, un antígeno común a nucleolos y vitelo podría ser de origen nucleolar; hace tiempo que se supone la participación del nucleolo en la elaboración del vitelo. En *Acetabularia*, las proteínas nucleolares han sido relacionadas con la producción de proteínas morfogenéticamente activas del citoplasma. Las dos proteínas citadas bien pueden ser ribosomales.

La emisión nucleolar de proteína a veces como «matriz» a partir del núcleo es cosa común, si no general. Se ha supuesto que las proteínas de anticuerpos y hormonas se acumularían en los nucleolos de las células donde dichas sustancias son metabolizadas. También se ha dicho que la hemoglobina sea sintetizada por el nucleolo del eritroblasto [20].

Ciertas analogías entre nucleolos y husos hacen pensar que los primeros tengan que ver con la producción de los segundos. En primer lugar, ambos parecen contener una sola proteína y concuerdan en otros rasgos químicos generales. En segundo lugar, existe una asociación entre el nucleolo y la función del huso [18]. En tercer lugar, la formación del huso es inmediatamente inhibida al irradiarse un nucleolo. En cuarto lugar, la proteína del huso es sintetizada antes de formarse éste, esto es, antes de que el nucleolo desaparezca y quizá mientras todavía recambia aminoácido. Pero la relativa abundancia de proteína del huso en la célula sugiere que no toda ella depende directamente de la síntesis nucleolar. Otra explicación es que el nucleolo sirve como mediador para la liberación de agentes que son activos estructuralmente con respecto al huso.

REFERENCIAS

[1] HUGHES, A. «The Mitotic Cycle». Butterworths Scientific Publications, Londres. 1952.
[2] MONTGOMERY, T. H. *J. Morphol.*, **15**, 265, 1898.
[3] HEITZ, E. *Planta*, **12**, 775, 1931.
[4] SCHREIBER, G. *Z. mikr.-anat. Forsch.*, **66**, 301, 1960.
[5] CASPERSSON, T. O. «Cell Growth and Cell Function». W. W. Norton, Nueva York. 1950.
[6] ESTABLE, C. y SOTELO, R. J. *Inst. Inv. Cien. Biol. Publ.*, **1**, 105, 1951.
[7] WILLMER, E. N. «Cytology and Evolution». Academic Press, Nueva York. 1960.
[8] BERNHARD, W. y OBERLING, C. «Problèmes d'ultrastructure et de fonctions nucléaires» (preparado por Thomas, J. A.), pág. 279. Masson et Cie., París. 1955.
[9] DALCQ, A. M. *Bull. Soc. zool. Fr.*, **79**, 240, 1954.
[10] CALLAN, H. G. y LLOYD, L. *Phil. Trans.*, *B*, **243**, 135, 1960.
[11] SCHLEIDEN, M. J. «Contributions to Phytogenesis» (apéndice a SCHWANN, T. «Microscopical Researches into the Accordance in the Structure and Growth of Animals and Plants»). Sydenham Society, Londres. 1847.
[12] EHRET, C. F. «Symposium on Information Theory in Biology» (compilado por Yockey, H. P.), pág. 218. Pergamon Press, Nueva York. 1958.
[13] DARLINGTON, C. D. *Symp. Soc. exp. Biol.*, **1**, 252, 1947.
[14] SERRA, J. A. *Rev. Port. zool. biol. gen.*, **2**, 117, 1959.
[15] BALTUS, E. *Biochim. Biophys. Acta*, **15**, 263, 1954.
[16] PERRY, R. P. *Exp. Cell. Res.*, **20**, 216, 1960.
[17] EDSTRÖM, J. E. *J. Biophys. Biochem. Cytol.*, **8**, 47, 1960.
[18] SIRLIN, J. L. *Progr. Biophys. biophys. Chem.*, **12**. (En prensa.)
[19] VINCENT, W. S. y BALTUS, E. *Biol. Bull.*, **119**, 299, 1960.
[20] O'BRIEN, B. R. A. *Exp. Cell. Res.*, **21**, 226, 1960.

Colorantes reactivos para la celulosa

I. D. RATTEE

La tintorería es una de las técnicas más antiguas, pero hasta hace poco más de cien años la preparación y el uso de colorantes era un arte más bien que una ciencia. El siglo transcurrido ha visto no tan sólo el descubrimiento de un gran número de colorantes sintéticos, sino también un gran avance en nuestros conocimientos del proceso del teñido. Un resultado reciente ha sido el desarrollo de un nuevo e importante tipo de colorantes, los colorantes reactivos, llamados así porque reaccionan químicamente con los grupos hidroxilo de las fibras tratadas. El colorante reactivo ideal no se ha descubierto todavía, pero el éxito inmediato de este tipo de colorantes ha estimulado extraordinariamente la investigación.

Hasta hace poco más de un siglo, sólo se teñían lotes pequeños de telas utilizando métodos empíricos basados en la aplicación de extractos de plantas, maderas e insectos. La expansión en la producción de tejidos, que fue una característica tan importante de la revolución industrial, trajo como consecuencia la racionalización del teñido de tejidos y su establecimiento como una técnica industrial avanzada. El descubrimiento del primer colorante sintético en 1856 por W. H. Perkin y el siguiente descubrimiento, tan importante para el desarrollo de los colorantes sintéticos, de la reacción diazóica por P. Griess, proporcionaron la base del rápido crecimiento de la industria de los colorantes. En los años que siguieron a estos primeros descubrimientos se consiguió la preparación de gran número de colorantes sintéticos; en la actualidad, se encuentran en el mercado más de 3500 productos químicos de los cuales 2000 contienen el grupo azo. G. S. J. White [1] calculó que en 1958 el gasto anual mundial en colorantes era de unos 300 millones de libras esterlinas; tan enorme cantidad se consumió en tintorerías algunas de las cuales tiñen unos diez millones de metros de tela semanales.

La importancia textil de las fibras celulósicas ha determinado el descubrimiento y explotación de unas ocho clases de colorantes especiales para ellas. La adición más reciente es la de los colorantes reactivos, cuyo uso se ha generalizado rápidamente, que han despertado más interés que ninguno de los tipos descubiertos previamente. A pesar de que todavía constituyen un grupo relativamente reducido formado por poco más de cien productos, están siendo objeto de muchas investigaciones y publicaciones de patentes. Esto se debe principalmente a dos causas que se pueden explicar fácilmente por referencia al propio proceso de teñido.

Al sumergir un producto textil en una solución de un colorante, la solución puede quedar simplemente embebida o el colorante puede pasar de la solución a la fibra. Las propiedades tintóreas se deben a la presencia en la molécula del colorante de ciertas distribuciones o grupos químicos que favorecen su disolución en la fibra o la formación de puentes de hidrógeno o de enlaces electrovalentes con la misma. Todos los colorantes, de cualquier tipo que sean, son absorbidos por la fibra en virtud de este mecanismo básico. Otra propiedad importante del colorante es su movilidad en la fibra, que determina su resistencia al lavado y a otros tratamientos húmedos. Esta resistencia puede estar afectada por la formación de puentes de hidrógeno, enlaces electrovalentes, la aglomeración del colorante en la fibra o por otras razones. En general, los colorantes retenidos mediante enlaces débiles tales como los puentes de hidrógeno, poseen poca solidez al lavado, debido a la reversibilidad inherente a la forma de fijación.

Para obtener un grado elevado de solidez al lavado, es necesario cambiar la naturaleza del colorante después de que ha sido absorbido por la fibra, a fin de que sea distinto de la forma inicial. Una manera de conseguirlo es la insolubilización del colorante. Los colorantes de tina, por ejemplo, son pigmentos que contienen sistemas quinónicos que primero se solubilizan por reducción alcalina con formación de las correspondientes sales sódicas y, después de que se ha absorbido en la fibra, la forma reducida del colorante se oxida para formar un pigmento insoluble que es retenido mecánicamente y que posee gran resistencia al lavado. En otros casos, se emplean sustancias que por sí mismas no son colorantes, pero que por reacción con un agente apropiado, tal como una sal de diazonio, forman un pigmento en la fibra. Este último método está extraordinariamente

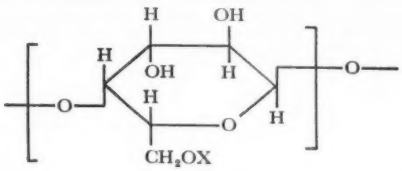
avanzado y de esta forma se pueden sintetizar hoy día incluso derivados de la ftalocianina de cobre en el interior de la fibra [2].

Otro método que se ha logrado recientemente para retener de forma permanente el colorante en la fibra consiste en utilizar un compuesto que contenga átomos o grupos lábiles capaces de reaccionar con la propia fibra con formación de un enlace covalente. Este método constituye la base de los colorantes reactivos. Antes de su aparición sólo se podían conseguir tintes sólidos para las fibras celulósicas por medio de las técnicas de «pigmentación» descritas previamente. Para obtener un colorante que actúe de esta forma es preciso incorporar ciertos grupos en la molécula, tales como el quinónico, lo cual limita extraordinariamente la producción de nuevas tonalidades; además, la insolubilización del colorante produce tonos más apagados. Los colorantes reactivos se fijan a la fibra por medio de un grupo que puede estar separado del sistema cromofórico y por consiguiente se puede obtener una gama mucho más amplia de tonalidades, incluyendo tonos brillantes que anteriormente eran imposibles de obtener con suficiente solidez sobre fibras celulósicas.

La obtención de tintes sólidos sobre fibras celulósicas por la técnica de «pigmentación» exige un tratamiento después del proceso inicial de teñido que suele desarrollarse en varias fases. Por ejemplo, para los colorantes de tina, la secuencia de operaciones es reducción→teñido→oxidación→jabonado. La aplicación de los colorantes reactivos es mucho más simple, y exige, a lo sumo, dos fases.

La popularidad de los colorantes reactivos se debe a estas dos características, y sus evidentes ventajas técnicas han sido la causa de que a los primeros colorantes reactivos para celulosa introducidos en 1956 por *Imperial Chemical Industries* con el nombre registrado «Procion», les siguieran rápidamente otros productos tales como «Cibacron» (Ciba), «Remazol» (Hoechst), «Drimarene» (Sandoz) y «Reactone» (Geigy). Aunque los primeros investigadores de los derivados coloreados de la celulosa no pudieron prever la magnitud de su importancia comercial, algunas ventajas de este método de teñido se habían previsto hacía mucho tiempo y el desarrollo industrial de los colorantes reactivos para celulosa debe considerarse como la culminación de las investigaciones llevadas a cabo durante más de sesenta años.

El estudio de los derivados coloreados de la celulosa se ha limitado a los obtenidos por esterificación o eterificación generalmente del hidroxilo unido al carbono 6 del anillo glucósico anhidro

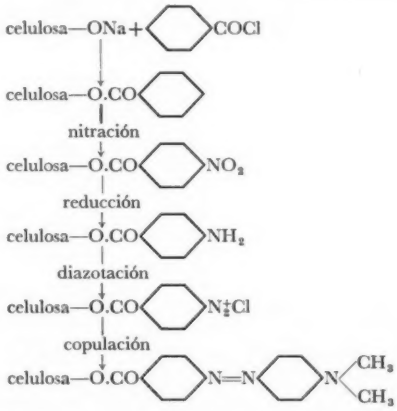


donde X representa un grupo acilo o aroílo en los ésteres y un grupo alquilo o arilo en los éteres.

De estos dos tipos de derivados, los ésteres de celulosa son los más fáciles de obtener y su estabilidad depende de la fuerza del ácido esterificador, siendo los ácidos más fuertes los que dan los ésteres menos estables. Los éteres son en general más difíciles de formar, pero son más estables. No obstante, esta diferencia no es absoluta, pues la estabilidad del producto depende también de la naturaleza del éter o éster formados. Debido a su relativa facilidad de preparación la atención se ha centrado principalmente en los ésteres.

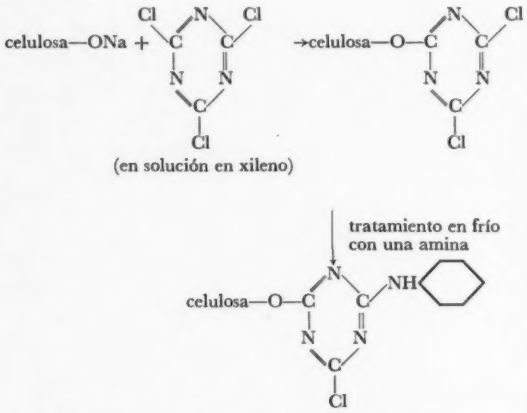
INVESTIGACIONES INICIALES

Entre los primeros investigadores de este campo figuran C. F. Cross y E. J. Bevan [3], que trataron la celulosa con una solución concentrada de sosa caustica y llevaron a cabo con la «celulosa sódica» así formada la siguiente serie de reacciones:



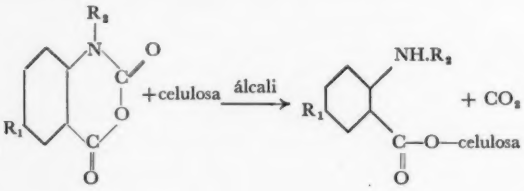
Aunque el color del derivado celulósico formado era muy sólido al lavado, la naturaleza de la fibra se había alterado de tal forma que carecía de valor práctico. Este procedimiento fue estudiado concienzudamente por otros muchos investigadores [4–7] utilizando otros reactivos acilantes, con el propósito de abreviar el proceso. Desde el punto de vista de su desarrollo posterior, son interesantes las investigaciones de Haller y otros [8] en 1930–33, quienes estudiaron el empleo de la 2:4:6-tricloro-1:3:5-triazina para acilar la celulosa,

utilizando la bien conocida tendencia de este compuesto a reaccionar escalonadamente, lo cual permite la reacción sucesiva de los tres átomos de cloro de acuerdo con la siguiente secuencia:



La celulosa coloreada se puede obtener por copulación con una sal de diazonio. Sin embargo, el procedimiento utilizado no se distinguía fundamentalmente del seguido previamente, pues exigía el empleo de disolventes orgánicos y producía una celulosa considerablemente degradada de poco valor para aplicaciones textiles.

La característica dominante de todos los trabajos iniciales era el empleo de una solución muy concentrada de sosa cáustica para preparar la celulosa sódica, basado en la suposición de que la celulosa era relativamente inerte y por tanto se necesitaban condiciones extremadas para obtener un grado adecuado de reacción. Esto parecía una consecuencia lógica de los trabajos para la preparación de derivados celulósicos para aplicaciones textiles y otros fines, donde se precisa un grado relativamente elevado de sustitución en la cadena celulósica. Sin embargo, para el teñido, el grado de sustitución requerido es raramente superior al 1–2% del número total de grupos hidroxilo presentes, y fue al establecerse este hecho cuando se vio que se podría encontrar un método adecuado. Esta posibilidad fue confirmada por F. Günther [9], quien consiguió esterificar la celulosa en condiciones relativamente suaves:

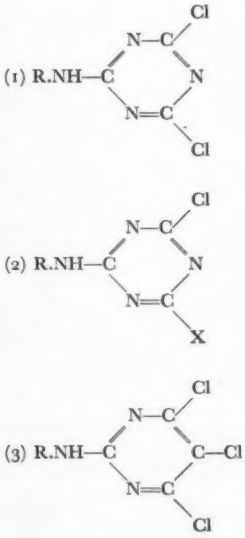


PRODUCCION Y USO DE COLORANTES ESTERIFICANTES

Sin embargo, no fue hasta después de 1950 cuando el trabajo de Günther se extendió a agentes esterificantes más satisfactorios. I. D. Rattee y W. E. Stephen estudiaron el empleo de los colorantes 2:4-dicloro-1:3:5-triazin-6-il-amínicos para la obtención de derivados celulósicos coloreados en un medio alcalino suave adecuado para un proceso de teñido. Este trabajo demostró que los colorantes en solución acuosa se fijaban rápidamente a la fibra si se aplicaban en forma apropiada. Aunque el grado de sustitución obtenido no era elevado, la reacción es suficientemente eficaz para constituír la base de un proceso de teñido que proporciona tintes sólidos con una gama de tonalidades y profundidad de color satisfactorias [10].

Se comprobó que empleando un álcali de fuerza parecida a la del carbonato sódico la reacción de estos colorantes con la celulosa se completaba en cinco segundos. Además, se encontró que se podía controlar la velocidad de reacción variando el *p*H o la temperatura, de forma que los colorantes se podían aplicar en todas las condiciones prácticas encontradas corrientemente en tintorería.

A consecuencia de estas observaciones, se obtuvo el primer grupo de colorantes reactivos para celulosa que recibieron el nombre comercial «Procion». Su éxito condujo a la investigación extensiva de los colorantes con grupos potencialmente esterificables, que ha resultado en la producción de los tres tipos siguientes de colorantes reactivos esterificantes para celulosa:



Colorantes «Procion» (I.C.I.). En estos colorantes ambos átomos de cloro son lábiles.

Colorantes «Procion H» (I.C.I.). Colorantes «Cibacron» (Ciba) En estos colorantes el grupo X no es lábil.

Colorantes «Reactone» (Geigy). Colorantes «Drimarene» (Sandoz). En estos colorantes sólo es lábil un átomo de cloro.

ETERES CELULOSICOS COLOREADOS

El estudio de la formación de éteres celulósicos dio origen a otro tipo de colorante reactivo que reacciona con las fibras celulósicas en las mismas condiciones generales que los colorantes esterificantes. Estos colorantes «Remazol» [11] tienen la fórmula general $R.SO_2.CH_2.CH_2.OSO_3Na$ y forman éteres celulósicos por eliminación de ácido sulfúrico y formación de $R.SO_2CH=CH_2$, que es un agente eterificante extraordinariamente activo.

Los éteres coloreados han sido objeto de menos atención que los correspondientes ésteres, sin duda debido a que eran relativamente más difíciles de obtener antes de que se descubriera el empleo del grupo vinil-sulfonilo para dicho fin. En 1926, D. H. Peacock [12] obtuvo un tinte sólido en la celulosa hirviendo algodón en una solución acuosa de cloruro de m-nitrobencil-dimetil-fenil amonio, seguido de reducción, diazotación y copulación. C. Granacher [13] preparó fibras que se podían diazotar mediante eterificación superficial de celulosa alcalina anhidra, utilizando cloruro de p-nitrobencilo y compuestos parecidos de cloro-metilo, o utilizando dinitrohalógenobencenos y reducción subsiguiente. Otros investigadores [6, 14–16] llevaron a cabo experimentos parecidos. El empleo directo de colorantes para la eterificación fue llevado a cabo por primera vez por J. D. Guthrie [17] quién encontró que se podían obtener tintes sólidos impregnando algodón con los ésteres sulfúricos de alcoholes en solución de sosa cáustica y calentando a 100–110° durante una hora como mínimo. Lo mismo que en el caso de los ésteres, ninguno de estos trabajos iniciales condujo a un proceso práctico de teñido, que sólo se pudo conseguir con éxito después del descubrimiento de los colorantes de sulfato de etilsulfonilo en 1944 [11, 18] y su aplicación subsiguiente a la celulosa utilizando las condiciones de reacción establecidas previamente en el campo de los ésteres celulósicos [10].

CINETICA DE LAS REACCIONES

Los cuatro sistemas de colorantes reactivos se parecen en que todos reaccionan con los grupos hidroxilo de la celulosa y con el agua en medio alcalino y en que, en cada caso, una sola reacción determina de forma decisiva la cinética de la reacción. Esto ocurre con los colorantes 2:4-dicloro-1:3:5-triazin-6-il-amínicos, potencialmente bifuncionales, y con otros colorantes que son claramente monofuncionales debido al carácter escalonado de la reacción de los compuestos dihalógeno-triazinílicos con compuestos hidroxílicos o amínicos. La reacción de uno de los átomos de cloro de estos colorantes con el agua da origen a un compuesto monocloromonohidroxi relativamente inerte, de manera que en lo que se refiere a la cinética del tinte, inicialmente sólo se necesita considerar un átomo de cloro. Por este motivo, el estudio de la cinética de la reacción de los colorantes diclorotriazinílicos con el agua o con la celulosa, que vamos a considerar a continuación, proporciona resultados que son aplicables a todos los sistemas reactivos conocidos hoy en día. En realidad, se puede decir que la teoría es válida para cualquier colorante reactivo aplicado a cualquier fibra, con tal que las únicas reacciones implicadas sean con la fibra y con el agua. Esta teoría tiene, por tanto, gran importancia.

Al estudiar este sistema, se ha de considerar en primer lugar la reacción secundaria con el agua, puesto que la extensión de esta reacción durante el proceso de teñido determina el rendimiento. Además, como se verá más adelante, la velocidad de la reacción con el agua a un pH determinado proporciona una medida indirecta de la reactividad del colorante con la celulosa.

La velocidad de hidrólisis de un colorante de dicloro-s-triazinilo en agua puede determinarse por distintos métodos, pero como sólo interesa la hidrólisis del primer cloro, la reacción coloreada entre los colorantes de dicloro-s-triazinilo y la piridina en presencia de sosa cáustica proporciona un elegante método de análisis [19, 20]. Utilizando esta técnica, se han determinado [21] las constantes de reacción de varios colorantes de dicloro-s-triazinilo con el agua y se ha visto que dichas constantes varían entre límites muy amplios y que dependen del *p*H.

A *p*H 10, la reactividad con el agua del colorante más reactivo entre los que se encuentran en el mercado es dieciocho veces mayor que la del menos reactivo. Al determinar si la celulosa se comporta de una manera parecida, se presentan dificultades y por esto los experimentos iniciales sobre la reacción de los colorantes con sustancias hidroxiladas se llevaron a cabo con compuestos tipo como la sorbita $CH_2OH(CHOH)_4CH_2OH$. El producto de la reacción colorante-sorbita da una reacción coloreada con la piridina en sosa cáustica, de forma que el curso de la reacción se ha de seguir electrométricamente. Manteniendo el *p*H a 10,5 como máximo y operando a temperatura ambiente y con exceso de sorbita, se han obtenido constantes de reacción de seudo-primer orden. Sus valores se dan en la Tabla 1. Puede verse que la reactividad con el agua y con la

sorbita es muy diversa, mientras que la razón de las constantes de reacción se mantiene relativamente fija.

TABLA I

Constantes de reacción a p*H* 10 *y* 25° *C*

Colorante dicloro-s-triazinílico	k_{H_2O} (min^{-1})	$k_{sorbita}$ (min^{-1})	$k_{sorbita}/k_{H_2O}$
Amarillo «Procion R»	$6{,}0 \times 10^{-4}$	$2{,}8 \times 10^{-2}$	47
Amarillo brillante «Procion 6G» ..	$3{,}4 \times 10^{-3}$	$1{,}4 \times 10^{-2}$	41
Rojo brillante «Procion 2B» ..	$1{,}1 \times 10^{-2}$	$4{,}6 \times 10^{-1}$	42
Rojo brillante «Procion 5B» ..	$4{,}6 \times 10^{-3}$	$1{,}8 \times 10^{-1}$	39
Azul «Procion 3G» ..	$3{,}7 \times 10^{-3}$	$1{,}4 \times 10^{-1}$	38
Azul brillante «Procion R» ..	$1{,}1 \times 10^{-3}$	$5{,}1 \times 10^{-2}$	46
Escarlata «Procion G»	$6{,}1 \times 10^{-4}$	$2{,}9 \times 10^{-2}$	44
Anaranjado brillante «Procion G» ..	$8{,}4 \times 10^{-4}$	$3{,}6 \times 10^{-2}$	43

También se ha estudiado el sistema manita-agua en un amplio intervalo de alcalinidad y empleando un solo colorante. Se determinaron las constantes de las reacciones de seudo-primer orden para la manita y para el agua, viéndose que la razón k_{manita}/k_{agua} disminuye al aumentar la alcalinidad. Sin embargo, esto puede dar una idea inadecuada de los hechos, pues bajo las condiciones de *p*H del experimento la manita puede formar iones. Estos iones pueden reaccionar; que esta reacción realmente ocurre queda probado por el hecho de que si se calculan las constantes de las reacciones bimoleculares en función de las concentraciones de manita O^- y OH^- utilizando los valores de los respectivos *p*K, la razón de las dos constantes de reacción se mantiene fija para todos los valores del *p*H, como puede verse en la Tabla II para un colorante típico.

TABLA II

Comparación de las razones de las constantes de reacción de seudo-primer orden y bimolecular (sistema manita-agua)

[NaOH]	k_{manita}/k_{agua}	$k_{manita\ O^-}/k_{OH^-}$
0,1N	1,05	13,5
0,2	0,89	13,5
0,4	0,66	14,3
0,6	0,58	14,7
0,8	0,40	12,2
1,0	0,41	14,5
2,0	0,20	15,8

Valor medio $k_{manita\ O^-}/k_{OH^-} = 14{,}1 \pm 1{,}2$

Este resultado demuestra que la reacción está regida por la concentración de iones del hidrato de carbono presentes y que, para un hidrato de carbono dado, los distintos colorantes, a pesar de sus amplias diferencias en reactividad, presentan todos la misma relación entre la reactividad con el ión del hidrato de carbono y con el ión hidroxilo.

Cuando se considera la reacción con la celulosa, el carácter heterogéneo del sistema celulosa-agua-colorante dificulta la aplicación del mecanismo anterior al proceso del teñido de la misma, puesto que en los cálculos de las concentraciones de los distintos reactivos debe considerarse la influencia de la afinidad y de la difusión y posiblemente de los factores estéricos en la fase sólida. Además, se ha de demostrar que los iones de la celulosa pueden existir en las condiciones de la reacción. Afortunadamente, en otros campos se ha presentado un problema parecido y P. V. Danckwerts [25] ha dado una ecuación que puede simplificarse en forma adecuada para el proceso de teñido:

$$Q = c\left(t + \frac{1}{2k}\right)\sqrt{(dk)}$$

donde Q = cantidad de colorante que se difunde por unidad de área a través de la superficie del sólido
c = concentración de equilibrio en la superficie
d = coeficiente de difusión
k = constante de reacción para la celulosa
t = duración del teñido.

H. Sumner [22] ha aplicado esta ecuación al comportamiento de los colorantes reactivos con la celulosa. Puesto que la ecuación de Danckwerts se refiere al caso ideal de difusión a través de una lámina de espesor infinito, los experimentos se llevaron a cabo con una película de viscosa en lugar de fibras. Después de determinar los valores de Q, c y d, Sumner pudo calcular los valores de k para distintos valores del *p*H y compararlos con los de la reacción con agua. Como en el sistema manita-agua, las razones no son constantes y varían entre 25 y 10. Pero el comportamiento del sistema manita-agua parece indicar que en realidad deberían compararse los valores de k basados en la reacción con grupos hidroxilo ionizados.

Sumner [23] ha presentado datos bien fundados basados en un equilibrio de Donnan y en el valor del *p*K de la celulosa dado por S. M. Neale [24] que apoyan la hipótesis de que el hidróxido sódico

se absorbe mediante un mecanismo de neutralización. La concordancia entre la cantidad de sosa cáustica absorbida y los valores predichos por la teoría de la neutralización es excelente. Si las constantes de reacción determinadas utilizando la ecuación simplificada de Danckwerts se corrigen teniendo en cuenta la formación de celulosa O^- y se calculan las razones entre las nuevas constantes y las de la reacción con OH^-, se obtienen valores prácticamente fijos para toda la región alcalina del *p*H (Tabla III).

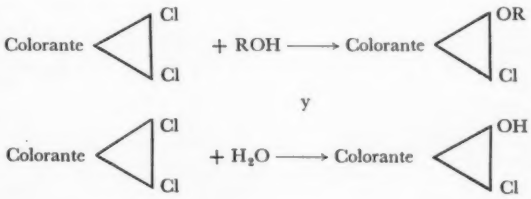
TABLA III

Comparación de las razones entre las constantes de reacción de seudo-primer orden y bimoleculares (sistema celulosa-agua a 20° C)

*p*H	k_{H_2O} (min^{-1})	$k_{celulosa}$ (min^{-1})	$k_{celulosa}/k_{H_2O}$	$k_{celulosa\ O^-}/k_{[OH]^-}$
8,00	$9,12 \times 10^{-4}$	—	—	—
8,81	$3,63 \times 10^{-3}$	—	—	—
9,14	$5,62 \times 10^{-3}$	—	—	—
9,46	$6,92 \times 10^{-3}$	$1,72 \times 10^{-1}$	25	0,95
9,74	$1,29 \times 10^{-2}$	$3,30 \times 10^{-1}$	26	1,16
10,99	$2,82 \times 10^{-2}$	$7,03 \times 10^{-1}$	25	1,16
11,70	$6,46 \times 10^{-2}$	1,59	25	1,28
11,94	$1,00 \times 10^{-1}$	1,87	19	1,06
12,63	$4,90 \times 10^{-1}$	7,71	16	1,37
12,73	$6,03 \times 10^{-1}$	6,52	11	1,03
		Valor medio = 1,14 ± 0,14		

Estos experimentos dan una explicación extraordinariamente sencilla de la reacción entre los colorantes reactivos y la celulosa. La reacción tiene lugar con los iones hidroxilo y con la celulosa ionizada y puesto que la concentración de estos iones es extraordinariamente baja en ausencia de álcali, la velocidad de reacción es despreciable. La adición de álcali aumenta la velocidad de ambas reacciones, pero la preferencia por la celulosa no se puede explicar a base de una mayor reactividad inherente de la celulosa, puesto que ambas constantes de reacción (es decir, para la celulosa O^- y para el OH^-) son del mismo orden de magnitud; por consiguiente, deben considerarse otros factores. En primer lugar se encuentra la afinidad del colorante por la fibra celulósica, que determina que la concentración de colorante en la fibra sea unas 500 veces mayor que en el agua. En segundo lugar, se tiene el valor más bajo de la constante de disociación de la celulosa comparada con la del agua (*p*K 13,7 contra *p*K 15,7) dando, para un *p*H determinado, un mayor grado de ionización en la celulosa en relación con el agua. Estos dos factores son suficientes para compensar la preponderancia del agua en la tina. La ecuación de Danckwerts sugiere que la afinidad del colorante por la fibra, expresada por medio de *c*, es el factor decisivo, puesto que los demás (difusión y reactividad) se expresan en la ecuación en forma de raíces cuadradas. No obstante, una afinidad elevada está frecuentemente asociada con una difusión baja; en la práctica se necesita un cierto equilibrio entre las dos.

Es probable que las constantes de reacción determinadas por Sumner para la reacción de la celulosa con el colorante reactivo no se refieran a una reacción fibra-colorante única. T. S. Gardner y C. B. Purves [26] han demostrado que el cloruro de toluén-p-sulfonilo reacciona con los grupos hidroxilo de la celulosa en C_6, C_2 y C_3 en la relación 23,4 : 2,16 : 0,106. Por tanto, es muy probable que en el trabajo de Sumner la esterificación afectase grupos hidroxilo primarios y secundarios y, puesto que las tres reacciones posibles son del mismo orden, esto no se pondría de manifiesto en las determinaciones de la celulosa ni invalidaría los resultados. Debido a que es imposible determinar la posición exacta dentro de la molécula de celulosa en que se fijan los colorantes reactivos, el problema se ha estudiado indirectamente utilizando colorantes diclorotriazinilamínicos y compuestos modelo y, con este fin, se han determinado las velocidades de reacción de varios de dichos colorantes con n-propanol e isopropanol [19]. Debido a que los colorantes son insolubles en los alcoholes puros, los experimentos se llevaron a cabo en soluciones al 50% de alcohol en agua, aplicándose una corrección para la velocidad de reacción en agua pura. Este artificio suponía que las reacciones



(donde ◁ representa el residuo s-triazinilamino y R el residuo alifático) transcurren separadamente.

Para el Rojo «Procion G», las constantes de reacción de primer orden (k(min^{-1})) resultaron ser 0,58 con el n-propanol y 0,08 con el isopropanol. La razón de las dos constantes de reacción concuerda bastante bien con las razones obtenidas por Gardner y Purves. Es de esperar que dicha razón

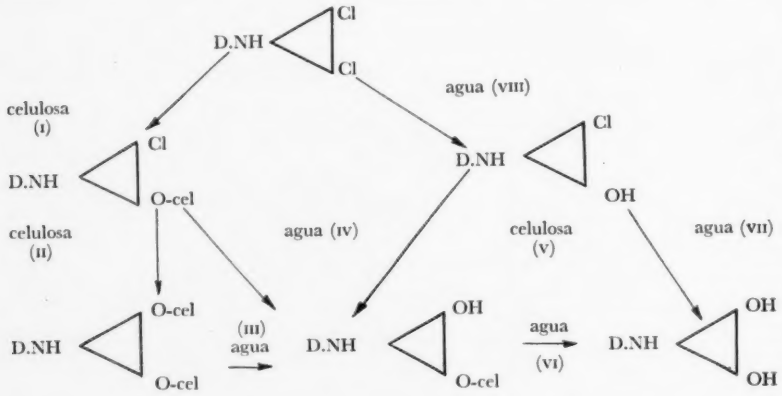
sea distinta para distintos agentes acilantes como se comprueba comparando (Tabla IV) las razones de las constantes de reacción para diversos colorantes diclorotriazinílicos.

TABLA IV

Colorante	Razón de las constantes de reacción (primaria/secundaria)
Rojo brillante «Procion 2B» ..	3,7
Azul brillante «Procion R» ..	6,6
Rojo «Procion G»	7,2
Amarillo «Procion R» ..	7,2
Azul «Procion HB»*	13,4
Rojo brillante «Procion H3B»*	15,2

* Colorantes monoclorotriazinílicos.

Los colorantes reactivos que contienen otros grupos reactivos se comportan de manera semejante. No obstante, se distinguen de los colorantes diclorotriazinílicos no sólo por su menor reactividad sino porque además poseen un sólo centro reactivo. Por otro lado, los colorantes diclorotriazinílicos pueden reaccionar de varias formas:



donde D es el residuo del colorante y ◁ es el residuo s-triazínico. La reacción I ya se ha estudiado; la reacción V es muy lenta y puede descartarse, y la reacción VI no se verifica en las condiciones ordinarias del teñido. Por tanto, las reacciones que determinan la velocidad del proceso son la I y la VIII, y la idea sugerida anteriormente para la cinética de la reacción permanece inalterada. No obstante, las reacciones II, III y IV tienen también interés porque dan lugar a productos de la reacción colorante-celulosa con propiedades diferentes.

La formación de enlaces entrecruzados (reacción II) y su subsiguiente ruptura ha sido demostrada por numerosos investigadores [27–29]. En la práctica del teñido, se pueden formar tres tipos de producto colorante-celulosa, que pueden llamarse tipo I, tipo 2 y tipo 3, que se originan mediante las reacciones I, II y III o IV, respectivamente. Debido a la reactividad escalonada de los halógenos en los compuestos halógeno-s-triazinílicos se pueden obtener tintes que sean ejemplos

TABLA V

	Hidrólisis ácida	Hidrólisis alcalina
Tipo 1	Relativamente estable, se convierte lentamente en el tipo 3	Se convierte primero en el tipo 2 y finalmente en el tipo 3
Tipo 2	Relativamente estable	Relativamente estable, se convierte finalmente en el tipo 3
Tipo 3	Relativamente inestable	Relativamente estable

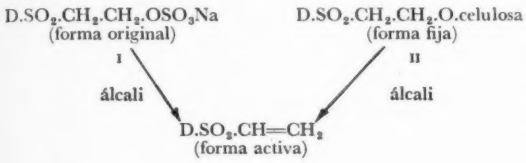
casi puros de estos tres tipos y sus propiedades de hidrólisis en ácidos y álcalis se han estudiado [21] con los resultados que se dan en la Tabla V.

LIMITACIONES DE LOS COLORANTES REACTIVOS

Los resultados anteriores tienen importancia práctica porque la solidez de ciertos colorantes diclorotriazinílicos varía durante el almacenamiento de los géneros teñidos. Por ejemplo, algunos colorantes diclorotriazinílicos del tipo 3 pierden gradualmente su elevada solidez inicial y los tejidos con ellos teñidos «sangran» al mojarse, debido a la ruptura de los enlaces colorante-fibra. Como los tipos 1 y 2 se transforman lentamente en el tipo 3 durante almacenamiento y de una manera más rápida si se tratan con un álcali, estos tipos también se deterioran, aunque con mayor lentitud. Industrialmente, este defecto se compensa de dos maneras: en primer lugar, puesto que no todos los colorantes presentan este defecto, se puede minimizar mediante selección cuidadosa;

en segundo lugar se puede utilizar el segundo halógeno reactivo de los tintes del tipo I haciéndolo reaccionar con una amina para dar los denominados tintes del grupo 4 $\left(D.NH\left\langle\begin{matrix}NHR\\O\text{-cel}\end{matrix}\right.\right)$, que son relativamente estables.

Este problema se presenta en mayor o menor grado con todos los colorantes azilantes, es decir, los basados en la s-triazina o la 1:3-diazina. Los colorantes que forman vinilsulfona no tienen este inconveniente, pero poseen defectos propios. El compuesto $D.SO_2.CH_2.CH_2O$-celulosa formado por reacción de estos colorantes con la celulosa, está relacionado con su forma original $D.SO_2.CH_2.CH_2.OSO_3Na$, si la celulosa se considera como un ácido débil. En medio alcalino que favorece la ionización de la celulosa, el compuesto fibra-colorante tiende a regenerar la vinilsulfona (fórmula abajo a la izquierda).



Como la celulosa es un ácido más débil que el sulfúrico, se necesita un *p*H más elevado para inducir esta reacción. No obstante, al lavar en caliente en un medio alcalino, tiene lugar la hidrólisis que determina la liberación del colorante de la fibra en una forma activa, que puede manchar cualquier material celulósico blanco con el que entre en contacto.

Es evidente que el colorante reactivo ideal para materiales celulósicos no se ha encontrado todavía y las investigaciones continuan en el mundo entero. La base económica de estos esfuerzos se asienta en el éxito extraordinario que ha obtenido esta clase de colorantes debido a la amplitud de la gama de colores y a la sencillez con que se aplican, sin olvidar su adaptabilidad a muchas técnicas nuevas de aplicación que conducen a sorprendentes aumentos de productividad.

REFERENCIAS

[1] White, G. S. J. *J. Soc. Dy. Col.*, **76**, 16, 1960.
[2] Gund, F. «Symposium on Textile Printing», pág. 147. Society of Dyers and Colourists. 1953.
[3] Cross, C. F. y Bevan, E. J. «Researches on Cellulose», pág. 34. 1895.
[4] Briggs, G. J. *Z. angew. Chem.*, **26**, 256, 1913.
[5] Schroeter, G. *Ber. dtsch. chem. Ges.*, **39**, 1570, 1906.
[6] Dirklage, R. Patente británica 389279.
[7] Riesz, E. *Bull. Soc. industr. Mulhouse*, **99**, 349, 1933.
[8] Ciba. Patente británica 363897.
[9] Günther, F. Patente norteamericana 1567731.
[10] Alsberg, F., Rattee, I. D., Stephen, W. E., Marshall, W. J., Speke, R. W. y Weston, C. D. Patente británica 797946.
Alsberg, F., Heslop, R. N., Rattee, I. D., Stephen, W. E., Marshall, W. J., Speke, R. W. y Weston, C. D. Patente británica 798121.
[11] Farbwerke Hoechst. Patente británica 733471.
[12] Peacock, D. H. *J. Soc. Dy. Col.*, **42**, 53, 1926.
[13] Granacher, C. Patentes británicas 346385, 347117 y 347263.
[14] Dreyfus, H. Patente británica 344420.
[15] I.G. Farben. Patente alemana 492062.
[16] Pancirolli, F. *Boll. Rep. Fibre tess. Veg.*, **32**, 314, 1937.
[17] Guthrie, J. D. *Amer. Dyest. Rep.*, **41**, 13, 30, 1952.
[18] Ciba. Patente británica 587467.
[19] Dawson, T. L., Preston, C. y Fern, A. S. *J. Soc. Dy. Col.*, **76**, 210, 1960.
[20] Sause, R. (Trabajo no publicado.)
[21] Preston, C. y Fern, A. S. *Chimia*, **15**, 177, 1961.
[22] Sumner, H. *J. Soc. Dy. Col.* (En preparación.)
[23] *Idem. Ibid.*, **76**, 672, 1960.
[24] Neale, S. M. *J. Text. Inst.*, **20**, T373, 1929.
[25] Danckwerts, P. V. *Trans. Faraday Soc.*, **46**, 300, 1950.
[26] Gardner, T. S. y Purves, C. B. *J. Amer. chem. Soc.*, **64**, 1539, 1942.
[27] Vickerstaff, T. *Amer. Dyest. Rep.*, **47**, 33, 1958.
[28] Wegmann, J. *Melliand Textilber.*, **39**, 1006, 1958.
[29] Schwertassek, K. *Faserforsch. u. Textiltech.*, **9**, 321, 1958.

El fuego griego

J. R. PARTINGTON

La caída de Constantinopla, en 1453, suceso capital a fines de la Edad Media, tiene profundo significado histórico. En la defensa de dicha ciudad durante varios siglos, contra una larga sucesión de ataques, el llamado «fuego griego» sirvió no poco para la protección del Imperio Bizantino. A pesar de la importancia militar de tal substancia, que quizás fuera más efectiva por el terror que causaba que por sus efectos reales, su composición química ha sido causa de no pocas controversias. En este artículo se aducen pruebas de que no era ni pólvora ni una mezcla de cal viva y azufre, como han indicado algunos, sino una fracción ligera de petróleo a la que se daba espesor con resina o azufre. También se señala que la atribución de tal invento a Calínicos no es convincente.

A muy remotas épocas se remonta el uso del fuego en los combates. Los asirios — nación entre las más belicosas de la antigüedad — usaban pez o petróleo crudo ardiendo para defender los muros de las ciudades sitiadas. Ya a partir del siglo V a.C. se emplearon barcos de fuego, aunque las flechas incendiarias, que aún usan hoy los pueblos primitivos, no son arma común en los ejércitos griegos hasta después de la muerte de Alejandro Magno. Apolodoro de Damasco (60–130 d.C.), arquitecto de Adriano, describe un complicado artificio con el que por medio de fuelles se arrojaba polvo de carbón ardiendo contra las murallas de piedra, que se resquebrajaban al rociarlas luego con vinagre. Los ejércitos romanos tenían flechas incendiarias cuyas puntas llevaban una mezcla de azufre, resina, betún y petróleo; en los sitios arrojaban desde lo alto de torres de madera largas javalinas cuya punta era una especie de cazo lleno de dicha mezcla.

El petróleo era, sin duda, conocido en la antigüedad y procedía de Partia, Media, Persia y las regiones que rodean los mares Caspio y Negro. Casi todos los yacimientos que producen todavía esa substancia en tales regiones se explotaban ya en tiempos muy remotos; otros, mencionados en antiguos relatos, han sido descubiertos en fecha reciente. El vocablo «nafta», usado ya por los griegos, se deriva del antiguo término persa *naft*. Estrabón señala que hallándose Alejandro Magno en la ciudad meda de Ecbatana presenció como en una calle, que antes habían regado con nafta, el fuego se propagaba rápidamente de un extremo al otro cuando aplicaban una llama. Plinio dice que el betún líquido de Babilonia servía para alimentar las lámparas. Había además una «nafta blanca» que se obtenía quizás filtrando el líquido crudo a través de tierra adsorbente, o, al principio ya de la Era Cristiana, por destilación. Ya en tiempos anteriores se sabía obtener un óleo de trementina y mercurio por medio de tosca destilación en la que el vapor de la substancia madre calentada en un caldero se condensaba en la tapa de éste enfriada con agua. Pero la verdadera destilación, en la que la retorta está separada del colector por un tubo o serpentín, es invención atribuida a María la Hebrea, alquimista egipcia de los comienzos de la Era Cristiana. Desde Egipto los alambiques pasaron a Siria, Arabia y Constantinopla, ciudad donde Stephanos tenía una escuela de química hacia la primera mitad del siglo VII. En excavaciones llevadas a cabo en Siria se han encontrado retortas de vidrio de la misma forma que las que aparecen dibujadas en manuscritos alquímicos griegos atribuidos a María. El petróleo crudo, procedente con toda probabilidad de la región del Caspio, llegaba a Constantinopla sobre todo para calentar los baños. Aunque no poseemos datos precisos sobre la destilación del petróleo, parece muy probable, dados el desarrollo histórico de tal proceso y la facilidad de obtención de la materia prima, que antes del siglo VIII se obtuviera ya un petróleo refinado.

Otra substancia incendiaria era el llamado «fuego automático», consistente de una mezcla de cal viva y algún material inflamable tal como el azufre, la resina, una pirita pulverizada o el petróleo. Al mojarse, la cal viva desprendía calor que, según se pensaba, bastaría para encender la substancia inflamable. Este «fuego automático» se untaba en los techos de madera, en las catapultas y torres de asalto, con la esperanza de que la lluvia o el rocío iniciaran un fuego. Se encuentra una receta del «fuego automático» en una interpolación del siglo VI a la obra *Kestoi*, escrita en griego por Julius Africanus, nacido en 170 d.C. en Jerusalén

y uno de los ingenieros militares del Emperador Alejandro Severo. En la interpolación se lee que la substancia se guardaba en arcas de bronce herméticamente cerradas y que debía «embadurnarse secretamente durante la noche sobre las máquinas del enemigo para que al salir el Sol fueran todas pasto de las llamas». Es probable que esta noción del «fuego automático» se derive de una noticia de Livio según la cual en las Bacanales de 186 a.C. se usaron antorchas hechas de cal viva y azufre que se encendían solas al sumergirlas en agua. Por otra parte, un relato chino de una batalla fluvial habida en 1161 d.C. dice que se emplearon en ella «proyectiles-truenos» que consistían en bolsas de papel llenas de cal y azufre que, al caer sobre el agua, lanzaban enormes llamaradas. Con todo, parece poco probable que tales artificios produjeran mayor efecto o que se emplearan nunca en un combate. Se ha afirmado que esta mezcla de cal viva y azufre era la base del «fuego griego»; pero hoy sabemos que las propiedades y utilización de este último eran muy distintas.

LOS INVENTOS BIZANTINOS Y ARABES

Constantinopla, baluarte durante muchos siglos contra las conquistas asiáticas, fue la cuna del verdadero fuego griego o greguesco. Sin embargo, el nombre — inexacto — de *feu grégeois* fue acuñado durante las Cruzadas. Los bizantinos no se consideraban griegos, sino romanos; el adjetivo «griego» tenía a la sazón un significado despectivo. Tanto los cronistas bizantinos como los árabes coinciden en que a partir del siglo VII comenzó a usarse en las batallas navales una substancia incendiaria mucho más terrible que todo lo que hasta entonces se conocía. La Constantinopla bizantina, que gracias a sus triunfos diplomáticos y militares había sabido resistir durante mucho tiempo los ataques de árabes, persas, godos, hunos, normandos, rusos y francos, tuvo que rendirse, al fin, en 1453 a los turcos, a los que había rechazado durante siglos.

La cultura bizantina, refinada y activa, se enraizaba en antiguas civilizaciones occidentales. El ejército de Bizancio, bien disciplinado, tenía ingenieros cuya preparación, disciplina y experiencia, mantenidas en un alto nivel desde los tiempos de Trajano y Constantino, eran excelentes: los arsenales romanos, aun en sus mejores días, no habían contenido artefacto de guerra que fuera desconocido a los bizantinos. La ciudad misma estaba llena de inventores y artífices; como hemos indicado, el alquimista Stephanos trabajaba en ella poco antes de la invención del fuego griego. Se estudiaba con curiosidad la química; en los siglos VII y VIII se recopilaban y editaban tratados griegos; en el IX, el filósofo Leo de Tesalónica construyó para el Emperador Teófilo un árbol de oro en cuyas ramas había pájaros artificiales que cantaban y aleteaban; hizo asimismo un león que caminaba y rugía, y una muñeca cubierta de joyas que también se movía gracias a un mecanismo interno. Tales artificios, aunque sin gran importancia en sí mismos, indican considerable progreso técnico. No podemos, pues, sorprendernos de que los bizantinos fueran también capaces de inventar y utilizar el fuego griego como arma de combate.

En su *Cronografía*, escrita en 811–15, Teófanes dice que en 671 el Emperador recibió noticias de que los árabes se aprestaban a atacar la ciudad y que para ello habían establecido sus cuarteles de invierno en Asia Menor. Como medida de defensa ordenó la concentración de una flota de barcos incendiarios armados de «sifones», artilugio lanzallamas del que nos ocuparemos con más detalle posteriormente. El sitio de la ciudad comenzó durante la primavera y continuó a lo largo de siete veranos. Finalmente, los navíos y tripulaciones árabes fueron destruidos en Kyzikos, en parte debido a una gran tempestad y en parte a una nueva forma de arrojar fuego que se decía ser invención del arquitecto Calínicos de Heliópolis (Siria), quien se había pasado a los romanos.

Los relatos que de los sitios nos han dejado los historiadores bizantinos y árabes son confusos, como han señalado Gibbon y otros escritores. Sin embargo, parece que hubo en total cinco expediciones: tres en 665, 668 y 674, una en 715, cuando de nuevo volvió a usarse el fuego griego, y una en 782. Los árabes llegaron a hacer un desembarco, pero no consiguieron capturar la ciudad; en 782 de nuevo estuvieron frente a Constantinopla pero de nuevo tuvieron que retirarse.

Queda incierto hasta qué punto Calínicos aportó verdadera ayuda en estos combates, y muy bien pudiera ser errónea la afirmación de que a él se debe el fuego griego. Teófanes dice que los barcos incendiarios armados en 671 llevaban sifones; puede ser que Calínicos preparase una nueva mezcla inflamable que hiciese más efectivos tales artefactos. Sin embargo, es evidente que hacia esas fechas ya había en Bizancio químicos griegos muy capaces de realizar la invención cuyo mérito se atribuyó a Calínicos en las esferas oficiales. Casi dos siglos más tarde, el Emperador Constantino Porfirogénito (905–59) dijo que la fórmula del fuego había sido revelada por un ángel a Constantino el Grande y que cualquiera que la divulgase

caía en anatema y moriría instantáneamente. Porfirogénito, aunque suministró tropas y máquinas bélicas a sus aliados, se reservó el secreto de la fabricación del fuego griego, enviándolo sólo ya manufacturado a sus vasallos, fieles sí, pero no siempre muy de fiar. Pero el fuego griego no era prerrogativa ni de emperadores ni de ángeles; había sido preparado por químicos y muy pronto otros químicos sarracenos se dedicaban afanosamente a reinventarlo.

En un tratado de táctica y estrategia militar atribuido al Emperador León (no se sabe si el isáurico (717–41 d.C.) o el macedónico (886–911 d.C.)) se lee: «Muchas y fortísimas máquinas de destrucción han sido inventadas por antiguos y modernos para atacar las naves y sus tripulaciones. Están entre ellas las que lanzan llamas con truenos y humareda, con las que se queman los navíos». El contexto indica que los «truenos» no significaban una explosión: los barcos ardían, no volaban. Con el tiempo se fueron deformando estas noticias hasta que exageradas descripciones posteriores, que llegan a su colmo en los textos orientales, han llegado a hacer creer a muchos que se trataba en realidad de explosiones causadas por una especie de pólvora.

León continúa describiendo «el otro artificio compuesto de pequeños sifones que se descargan a mano desde detrás de pantallas de hierro, a los que se da el nombre de sifones de mano y que recientemente hanse fabricado en nuestros dominios . . . con ellos se puede arrojar el fuego al rostro del enemigo». Se ha pensado que se trataba de granadas de mano rellenas de pólvora, pero hoy ya no cabe duda alguna acerca de su carácter. El término «sifón» se empleaba comúnmente para indicar una bomba impelente; en un manuscrito del siglo x aparece ilustrada una de tales bombas movida a mano arrojando fuego griego. En el siglo siguiente, Abu'-l-Qasim, después de describir e ilustrar en su tratato de cirugía una jeringa cilíndrica con un pistón, añade que «es como el tubo que se emplea para arrojar nafta ardiendo en los combates navales».

León describe también la manera en que el fuego griego se lanzaba desde un barco: «En la parte delantera de la nave hay un tubo de bronce de tal manera dispuesto que el fuego puede lanzarse hacia adelante, a la izquierda, a la derecha a caer desde lo alto. Este tubo está montado sobre un falso tejadillo sobre la cubierta, en la que se acomodan los encargados de manejarlo; el tejadillo se eleva por consiguiente sobre las fuerzas de ataque apostadas en la proa. El fuego se dirige contra los barcos del enemigo o a la cara de las tropas que atacan». También tenemos un dibujo, aunque no muy exacto en este caso, de tal disposición, contenido en un manuscrito del siglo x (Fig. 1). No parece pues caber duda que el elemento esencial era un líquido flamígero proyectado por medio de un sistema de bombeo a través de un tubo metálico.

FIGURA 1 — *Uso del fuego griego en una batalla naval. (Según un manuscrito bizantino del siglo X.)*

Ana Comnena, hija del Emperador Alejo I, describe una batalla naval entre griegos y pisanos cerca de la Isla de Rodas en 1103. Todas las galeras bizantinas llevaban en la proa un tubo que terminaba en una cabeza de león u otro animal feroz, hecha de latón o hierro dorado, de temible catadura, a través de cuyas fauces se expulsaba el líquido inflamado, alimentado por medio de un tubo flexible. La táctica era pasar por ojo el barco enemigo y rociarlo de fuego. Los pisanos, que nunca habían sufrido tal castigo, se dieron a la fuga, maravillados de ver que las llamas, que siempre arden hacia arriba, pudieran caer desde lo alto o venir de uno u otro costado según las dirigiera el lanzafuegos. Este relato coincide exactamente con el anterior citado del Emperador León. Al parecer, la manga lanzallamas podía girar dentro de las fauces de la máscara de la fiera dirigiendo así el líquido ardiendo hacia el punto deseado.

Ana Comnena menciona asimismo una especie de cerbatana incendiaria por la que se soplaba un polvo o pasta flamígeros; no parece que tal arma causase mayores daños, aunque produjo un efecto formidable. La misma escritora relata que durante una escaramuza dentro de una zapa subterránea en el sitio de Durazzo (1108), los bizantinos usaron tales sopletes y los normandos huyeron, no heridos pero sí con las barbas chamuscadas.

Después de los reveses sufridos ante Constantinopla, los árabes que conocían ya el petróleo, se pusieron también a fabricar un fuego griego gracias a la ayuda de sus expertos químicos. Bajo los Abasidas, oriundos de Persia, los ejércitos musulmanes tenían «batallones de nafta», vestidos con uniformes ignífugos, que manejaban

unas bombas especiales con las que arrojaban el líquido ardiendo. En el siglo x los árabes introdujeron en la China un «óleo furibundo» que los chinos pronto aprendieron a usar lanzándolo con una bomba impelente.

Durante su viaje de Chipre a Acre, el rey inglés Richard I, capturó un transporte sarraceno cargado de toda clase de armamento y gran número de botellones llenos del líquido greguesco, los cuales, según un testigo, se habían embarcado en Beirut. En un manuscrito árabe del siglo XIII hay dibujos de naves cargadas de damajuanas y bidones esféricos. En el siglo XII los árabes habían manejado ya cantidades considerables de petróleo: se habían usado 20 000 barriles de dicho líquido para incendiar la ciudad del Cairo e impedir así su recaptura por los Francos. Según relatos árabes, también los bizantinos tenían enormes reservas de nafta que, según se decía, estaban almacenadas en las iglesias.

Para los cruzados, contra quienes los sarracenos usaron el fuego griego, era éste un arma nueva y desconcertante. Jean de Joinville (1224–1319),en cuya época se conocía ya la pólvora y el cañón era inminente, describe el sitio de Mansura, en el delta del Nilo, en 1249, ocasión en la que Mamluk Sultán hizo prisionero al Rey Louis IX de Francia. Los sarracenos — dice — descargaban con catapultas cubas llenas de la substancia flamígera: «eran como un gran tonel con una cola del largo de una larga lanza; retumbaban como truenos y parecían furiosos dragones que volaran por el aire dando tanta luz que podía verse en nuestro campamento como si fuera pleno día». Cuando el comandante francés vio que los sarracenos se disponían a descargar el fuego, anunció con gran pánico que su ejército estaba perdido.

Los cruzados creían en la muerte segura de toda persona tocada por el fuego, no sólo porque éste matase instantáneamente sino porque sus emanaciones eran veneno mortal; también más adelante toda herida de bala, por insignificante que fuese, se consideraba asimismo mortal. Pero a pesar de todo este terror, Joinville no cita ni un solo muerto por el fuego griego. Es pues evidente que se exageraban mucho sus efectos. También en algunos tratados árabes sobre el empleo bélico de las materias incendiarias de los siglos XII y XIII se encuentran noticias algo fantásticas sobre el uso de la nafta destilada. Se dice, por ejemplo, que si se arrojaba un cántaro lleno de ella contra el muro de un castillo las exhalaciones de la mezcla se incendiaban y el castillo se derrumbaba con pavoroso estrépito de truenos y resoplidos. Todo lo que de sus escombros quedara podía destruirse con una mezcla de agua y nafta, que ardía arrojando un espeso humo negro que asfixiaba a quien lo respirase. Tales exageraciones muestran hasta qué punto eran temidas estas armas misteriosas y la ventaja psicológica que en un combate tenía quien las empleaba.

COMPOSICION DEL FUEGO GRIEGO

La composición del fuego griego, que durante mucho tiempo ha sido tema de investigaciones y controversias, puede deducirse casi automáticamente de las citadas descripciones de su uso y efectos. Era un líquido, preparado mediante algún procedimiento entre otros muchos posibles, que incendiado ya se proyectaba por medio de una bomba impelente (sobre todo en las batallas navales) o que se lanzaba dentro de granadas de mano o en grandes barriles por medio de catapultas (en los combates terrestres). Las bombas que lo proyectaban se llamaban «sifones»; los «sifones de mano» eran pequeñas bombas impelentes que manejaban los soldados de infantería.

Es interesante recordar que Jacques de Vitry y Gossuin de Metz, en la época de las cruzadas, dicen que el fuego griego estaba hecho con un líquido que procedía de ciertos manantiales del Oriente; esto apoya la hipótesis ya indicada de que la base de dicha substancia era una fracción ligera del petróleo obtenida por destilación. La gasolina misma no sería muy efectiva para su uso en lanzallamas, ya que el chorro se disiparía muy rápidamente y no llegaría a una distancia suficiente. Para salvar este defecto se espesaba disolviendo probablemente en la esencia resina y quizás también azufre, hasta formar una especie de jalea, mezcla pegajosa que, al adherirse a los objetos, sería mucho más eficaz. Esta mezcla, junto con los medios mecánicos para proyectarla, es lo que constituyó la invención llamada el fuego griego.

Otros datos contenidos en noticias compiladas mucho después de la introducción del fuego griego nos ayudan además a establecer su composición. En el *Libro de los Fuegos de Marcos el Griego*, llamado también *Liber Ignium*, se encuentra una receta. Durante mucho tiempo se ha supuesto que este libro es una traducción latina de un original griego, como parece indicar su nombre; pero nosotros hemos mostrado que es casi seguro que el texto griego no existió nunca sino que fue compilado en España, entre 1250 y 1300, probablemente por un escritor judío que utilizó fuentes árabes. La receta dice: «Esta es la manera de preparar fuego griego: tomarás azufre vivo, tártaro, sarcocola y brea, sal cocida, aceite de petróleo y aceite común,

substancias que hervirás todas juntas y con las que luego empaparás estopa y alumbrarás un fuego. Apagarás el fuego, lo que sólo se consigue con orina, vinagre o arena». Aunque se ha dicho que la «sal cocida» debía ser salitre, hoy no cabe duda, según demuestran otras fuentes, que era sal común refinada mediante ebullición y evaporación; además, el término *sal coctum* no se usa nunca para el salitre. La sal daría color amarillo a la llama produciendo así la impresión de una gran temperatura.

Hay otra receta en un manuscrito árabe redactado por orden de Saladino hacia 1193; en ella se especifica una «nafta arrojadiza», compuesta de petróleo, alquitrán, azufre y resina. Otra tercera receta aparece en un manuscrito árabe que es copia de otro original de *c.* 1225; en este caso el petróleo se purifica y blanquea tratándolo con alumbre, clara de huevo y otras substancias, filtrándose luego en arena. Se destila en una cucúrbita y alambique, siendo de especial interés que en el proceso de destilación usado en Basra la nafta destilada se redestila en un recipiente haciendo arder debajo de éste cañas «una por una», o sea un calor muy suave, lo que indica una fracción del petróleo de muy bajo punto de ebullición. Una mezcla de tal esencia con resina, grasa, pez y azufre arde en el agua.

Ana Comnena da además la siguiente receta: «Este fuego se hace con las siguientes artes. Se recoje la resina inflamable que dan el pino y otros árboles, la cual se amasa con azufre e introduce en cañas por las que se sopla muy fuerte y seguido». No se menciona aquí el petróleo destilado, que es el ingrediente esencial, pero evidentemente la hija del emperador bizantino no tenía interés alguno en revelar el secreto.

A pesar de todas esas pruebas de que la nafta era uno de los componentes, muchos escritores han dicho que el fuego griego era una pólvora, lo cual no corresponde ni a sus propiedades ni a la manera de uso. Es más, no hay indicación alguna de que en la época en que se utilizaba el fuego griego en gran escala se conociera ya el salitre, constituyente esencial de la pólvora. Otros han sugerido diferentes substancias, tales como los primitivos productos incendiarios y el «fuego automático», compuesto de cal viva y azufre, y han supuesto que el fuego griego también los contenía. Pero, como era sólida, tan substancia no podía ser proyectada de la manera en que lo era el fuego griego, ni hubiera podido tener sus propiedades. Se han propuesto asimismo otras composiciones totalmente imposibles en la época a que nos referimos, tales como el fosfuro cálcico. Sin embargo, todos los datos, que he reunido en mi libro *A History of Greek Fire and Gunpowder* (Cambridge, 1960), parecen indicar que el salitre no era ingrediente del fuego griego, que éste era muy distinto de la pólvora y que su principal constituyente era la nafta, espesada mediante la adición de resina o azufre.

Revista de libros

CIENCIA GENERAL

McGraw-Hill Encyclopaedia of Science and Technology, Vols. I–XIV, Aba-Zyt, 9040 págs.; Vol. XV, Indice, 536 págs, McGraw-Hill Book Co. Inc., Nueva York: McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., Londres. 1960. £75 11s. 6d.

Desde hace tiempo se ha venido sintiendo la necesidad de una obra de consulta más detallada que una enciclopedia general pero también de más fácil manejo que un tratado. Tal necesidad la han sentido no sólo los científicos que quieren mantenerse al corriente de los progresos en otras especialidades, sino también el público en general, dado que en nuestra sociedad la ciencia ha adquirido creciente importancia. La presente enciclopedia se propone satisfacer dicha necesidad.

Sus compiladores han tenido que decidir desde el principio la amplitud de su contenido; éste comprende todos los elementos básicos de las ciencias naturales y sus aplicaciones más importantes en ingeniería, agricultura, silvicultura, biología industrial, tecnología nutricional y otras; sin embargo, de la medicina, farmacia, farmacología y las ciencias behavioristas sólo se incluyen aquellos elementos que pudiéramos llamar «pre-profesionales». Otra restricción es la que afecta a la historia y la filosofía, disciplinas que sólo se recojen en cuanto son necesarias para la comprensión básica de un concepto científico o de su aplicación técnica.

Para que un libro de esta clase cumpla su cometido es preciso restringir su contenido: la limitación que se ha impuesto a las materias de que éste trata nos parece razonable. También nos lo parece la exclusión de la historia y la filosofía, aunque los resultados son a veces algo sorprendentes: el artículo referente a la «bomba atómica» sólo da una breve descripción y explicación de los principios sobre los que se basa, sin referencia alguna a todos los demás problemas con ella relacionados.

La publicación de una obra de este tipo crea problemas editoriales muy graves, que lo son más aún si los que en ella cooperan están alejados entre sí o trabajan en diferentes idiomas. Por lo tanto no es de extrañar que los 63 asesores sean todos norteamericanos; peor nos parece que de los colaboradores — bastantes más de dos mil — sólo 60 no sean norteamericanos, lo cual es criticable no desde un punto de vista nacionalista sino práctico. Por

lo que se refiere a las informaciones de tipo científico esto no tiene mayor importancia ya que en un volumen de este tipo, lo que escriba un norteamericano no ha de diferenciarse mucho de lo que hubiera escrito otro colaborador del mismo calibre pero de distinta nacionalidad. Pero sí se debilitan las secciones técnicas ya que, como es natural, se tiende a subrayar la práctica norteamericana. Por ejemplo el importante artículo sobre la generación de fuerza eléctrica no menciona ningún otro método que los usados en Estados Unidos.

La selección de los colaboradores ha atendido sobre todo a ciertas consideraciones prácticas y de urgencia. En este último sentido hay que indicar que esta enciclopedia está asombrosamente al día. Por ejemplo, el artículo sobre la Luna contiene una descripción completa de la fotografía del lado oculto, junto con una ilustración. El descubrimiento de ^{129}Xe en los meteoritos, que data del pasado año, se indica ya en el artículo respectivo. La obra se mantiene al día por medio de una serie de suplementos anuales y de constantes revisiones del texto.

Los artículos sobre temas especializados son muy completos; los textos son lúcidos y detallados y las ilustraciones numerosas y claras. Hemos podido comprobar que, en general, los artículos contienen la información deseada, aunque a veces bajo encabezamientos inesperados. En este sentido el índice — muy completo — es muy valioso, aunque hubiera sido de desear otro índice clasificado suplementario. Los artículos contienen referencias cruzadas y breves bibliografías.

Las críticas que pudieran hacerse son mínimas y se refieren a defectos inevitables en una obra de tal naturaleza. En conjunto, la obra cumple muy bien su propósito y debe ser por lo tanto muy bien recibida.

TREVOR I. WILLIAMS

MATEMATICAS

FINKBEINER, Daniel T.: *Introduction to Matrices and Linear Transformations.* VII + 248 págs. W. H. Freeman & Co. Ltd., Londres. 1960. 38s.

Hay varios métodos de presentación a los estudiantes de la teoría de matrices; en este libro el elegido es el moderno que consiste en usar las técnicas del álgebra abstracta. Los tres primeros capítulos tratan de los sistemas abstractos, espacios vectoriales y transformaciones lineales. Se desarrolla luego la teoría de matrices hasta la forma canónica para una transformación lineal. Los dos últimos capítulos tratan de los conceptos métricos (funciones bilineales y cuadráticas, longitud, distancia y ortogonalidad) y funciones de matrices, incluyendo una aplicación de las ecuaciones diferenciales. Hay además apéndices breves y bien redactados sobre conceptos algebraicos y equivalencia combinatorial, con soluciones para los ejercicios.

El cálculo de matrices es muy importante en diversas ramas de la ciencia aplicada, incluyendo la economía, psicología e investigación operacional. Los interesados en esas materias que hayan estudiado matemáticas a un nivel similar al del primer curso universitario hallarán interesante este libro, ya que, como dice su autor, «el prerrequisito esencial . . . es la capacidad de razonar de manera abstracta y progresar lógicamente de una hipótesis a su conclusión».

L. S. GODDARD

ASTROFISICA

BAKER, R. M. L. (Jr.) y MAKEMSON, M. W.: *An Introduction to Astrodynamics.* XIV + 558 págs. Academic Press Inc., Nueva York; Academic Books Ltd., Londres. 1960. $7,50.

Este libro es realmente una introducción al estudio de la dinámica del sistema solar. En tanto que tal debemos recibirlo bien, sobre todo dado que satisface plenamente las necesidades de los lectores interesados en obtener un conocimiento detallado de la moción de los satélites planetarios y de los vehículos espaciales, pero cuyo conocimiento astronómico no sea muy profundo. El tratamiento es a veces matemático y a veces descriptivo. Las secciones descriptivas son de fácil lectura; las matemáticas suponen en el lector los conocimientos comunes a un graduado de ciencias, pero no nociones previas de dinámica.

Los cinco primeros capítulos tienen carácter introductorio y contienen un estudio de los elementos de la teoría orbital, una descripción histórica de la astronomía del sistema solar, concluyendo con una excelente sección sobre la deducción de las principales unidades de distancia en el sistema solar, de las masas planetarias y de la Luna.

Los capítulos restantes tratan de la determinación de las órbitas partiendo de observaciones, incluyendo la mejora de los elementos orbitales por el método de correcciones diferenciales; también se describen las técnicas de perturbación. Uno de esos capítulos trata de las perturbaciones orbitales de un satélite cercano a la Tierra. Hay una sección sobre la moción en un campo de cuerpos múltiples y una breve mención de la aplicación de los métodos de perturbación en este caso; pero es lástima que se haya omitido la descripción de las soluciones obtenidas en el caso importante de la moción en el sistema Tierra-Luna. Los capítulos finales se refieren brevemente a las técnicas observacionales — tanto en las longitudes de onda ópticas como hertzianas — y los métodos de dirección y control de vehículos interplanetarios.

Contiene además un extenso glosario, valioso para el lector no especializado en astronomía. A. P. WILLMORE

FISICA

PERUCCA, E.: *Fisica Generale e Sperimentale* (7ª edición, enteramente revisada). Vol. I, XXVIII + 920 págs; Vol. II, Parte I, XII + 618 págs; Parte II, XI + 619–1228 págs. Unione Tipografico-Editrice, Turín. 1960. Vol. I, 12 000 liras; Vol. II (ambas partes), 16 500 liras.

Durante más de 25 años éste ha sido el tratado clásico de física experimental. Su autor, siempre joven, merece toda felicitación por esta nueva edición aumentada y totalmente puesta al día. Siguiendo la vieja tradición, nos presenta un gran cuadro, obra de una sola mano, a diferencia de la moda actual en que los textos están redactados por muchos especialistas. Le falta, como es propio, la autoridad de este último género de obra, pero tiene la ventaja de una exposición uniforme, enfocada desde un punto único. Además la presentación es extraordinariamente clara y sirve de prueba evidente del inmenso valor de una preparación humanista para un buen enfoque de la física. Es imposible escribir una breve reseña de un libro de este carácter. Pero, como al azar, queremos señalar que demuestra el valor del uso lógico y mantenido del sistema racionalizado de unidades MKS; que se ha conservado un juicioso equilibrio en las ilustraciones experimentales de los principios físicos fundamentales de interés histórico y sus correspondientes modernos; y que el contenido teórico es suficiente habida cuenta del propósito del libro: preparar a los estudiantes universitarios

italianos para el examen en *Fisica sperimentale*. L. PINCHERLE

ROCARD, Y.: *General Dynamics of Vibrations*. XII + 522 págs. Crosby Lockwood & Sons Ltd., Londres. 1960. 80s.

Hasta hace poco el único tratado adecuado sobre la teoría de las vibraciones era el del Profesor Den Hartog, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Este libro, que es una traducción inglesa de la tercera edición francesa, se convertirá sin duda en autoridad reconocida. Cubre un campo muy amplio de las aplicaciones en ingeniería y las estudia con ayuda de un análisis matemático adecuado. Hay también aplicaciones a la maquinaria, a la acústica electrónica en radioingeniería, a la teoría giroscópica, a los filtros electrónicos y a las oscilaciones de relajación de los sistemas no lineales. Se incluyen hasta las vibraciones (*shimmy*) de las ruedas de los automóviles. G. TEMPLE

LANDAU, L. D. y LIFSHITZ, E. M.: *Electrodynamics of Continuous Media* (traducción del ruso de J. B. Sykes y J. S. Bell). X + 417 págs. Pergamon Press, Londres. 1960. 84s.

Este volumen es la Parte 8 de un curso de física teórica y alcanza el elevado nivel esperado de dos distinguidos físicos. Está presentado en forma de notas de clase y es especialmente valioso por las excelentes colecciones de ejemplos con soluciones completas que contiene.

Como se trata de un tratado de física teórica se omiten, naturalmente, los detalles experimentales. Son de particular valía las secciones sobre electrostática y los dieléctricos; aunque otras secciones están algo condensadas, como, por ejemplo, la que trata del paso de las partículas rápidas a través de la materia, todo físico hallará este volumen muy valioso como obra de consulta, siempre que posea un conocimiento adecuado del análisis tensorial. L. F. BATES

CRISTALOGRAFIA

VAN BUEREN, H. G.: *Imperfections in Crystals*. XVIII + 676 págs. North-Holland Publishing Co., Amsterdam. 1960. £5 10s.

Es muy importante la función que las imperfecciones de los cristales ejercen en las propiedades físicas de los mismos. En algunos casos, como en lo que a la resistencia mecánica se refiere, su importancia es decisiva. En las tres décadas últimas se han realizado estudios sistemáticos de las imperfecciones, estudio que se ha convertido en extensa rama de la física, de inmensa importancia para la tecnología. El propósito del libro que reseñamos es resumir lo más concisamente posible tanto las teorías como los datos sobre los que éstas se basan.

La primera parte trata de las propiedades de las imperfecciones reticulares de una manera general, especialmente de los defectos puntuales y las dislocaciones. La segunda estudia en más detalle las imperfecciones en los metales y su importancia respeto a la deformación plástica, el endurecimiento, el flujo, etc. y su efecto en propiedades importantes tales como la conductividad térmica y eléctrica. La tercera parte trata de las imperfecciones de los cristales no metálicos, especialmente los haluros alcalinos, los haluros de plata y los materiales de estructura diamantina — silicio y germanio — de gran importancia industrial.

Esta rama de estudio es ya tan vasta que para que el libro sea manejable es preciso que quede mucho fuera de él. La selección ha sido buena. Los resultados de los cálculos teóricos están acompañados de los datos sobre los principios de derivación necesarios para poder seguir la argumentación. Sin embargo, los diagramas son a veces tan condensados que resulta difícil su interpretación. Las pruebas experimentales están presentadas sucintamente y bien ilustradas con excelentes planchas fotográficas. Las referatas a trabajos originales son muy numerosas. M. H. L. PRYCE

QUIMICA

SANDERSON, R. T.: *Chemical Periodicity*. X + 330 págs. Reinhold Publishing Corporation, Nueva York; Chapman and Hall Ltd., Londres. 1960. 94s.

El rápido incremento de los datos en química orgánica hace que se observen con interés todos los esfuerzos originales para clasificar y correlacionar dichos datos. El autor de este libro intenta hacer uso especial para tal propósito del concepto de electronegatividad.

El libro comienza con un breve estudio de la estructura del átomo y de sus niveles de energía, tratando luego de la naturaleza de los enlaces químicos. Esta sección va seguida de un estudio de la electronegatividad en el que se subrayan, como es natural, los valores electronegativos empíricos establecidos por el autor y denominados «cocientes de estabilidad». Los define como la razón entre la densidad media del átomo y la de un hipotético átomo isoelectrónico de gas inerte.

En los capítulos III y IV se estudian temas tales como la polaridad de los enlaces, su distribución de carga, su energía, la estructura molecular y ciertos aspectos de la química de coordinación.

Sigue luego un útil capítulo sobre la naturaleza física de los elementos. El resto del libro está dedicado principalmente a un estudio de los compuestos binarios de los elementos con el oxígeno, nitrógeno, halógenos y carbono. Esta limitación restringe naturalmente el tratamiento de los demás tipos de compuesto.

Sin embargo, el principal inconveniente de este libro es que no utiliza adecuadamente otros principios complementarios físico-químicos, tales como la función de las energías reticulares, las energías de hidratación y la teoría del campo cristalino (ligandos). También es algo extraña la relativa atención que se presta a ciertos temas: así el uso de las constantes de acoplamiento cuadrúpolo ocupa toda una página, mientras que la teoría de los ligandos sólo merece un cuarto de página. Existe además la tendencia a considerar los compuestos complejos como un tema más bien que como un enfoque de la química inorgánica en conjunto.

Los profesores encontrarán de gran utilidad los datos tabulados y los gráficos. Muchos de los conceptos expresados son también estimulantes y sugeridores. Pero, por otra parte, no quedamos muy convencidos de que el autor haya sabido demostrar la fundamental unidad de este tema, a la que se refiere en el prefacio. R. S. NYHOLM

COATES, G. E.: *Organo-Metallic Compounds* (2ª edición). XIII + 366 págs. Methuen & Co. Ltd., Londres; John Wiley & Sons Inc., Nueva York. 1960. 45s.

La primera edición de este libro, publicada en 1956, fue muy bien recibida. Desde entonces esta obra ha sido muy consultada tanto por los estudiantes universitarios como por los investigadores. Sin embargo, en cuatro años se han realizado tan importantes progresos en esta rama que se ha considerado necesaria una nueva edición

del texto revisado. La gran cantidad de nuevo material ha creado un grave problema y aunque el autor ha ejercido una selección más rigurosa que en la primera versión, se ha doblado el volumen de ésta, que es ahora mucho mayor que el resto de los libros que forman la serie en que por vez primera apareció esta obra. La mayor parte del texto ha sido redactado de nuevo; las adiciones más importantes se refieren a las secciones sobre los metales alcalinos, el boro, el estaño y, en particular, los elementos de transición. También se estudian mucho más extensamente los problemas de la valencia, por ejemplo los que se refieren a los complejos π-metal-hidrocarburo, mencionados sólo brevemente en la primera edición. En un libro de este tamaño no puede ser muy completo el tratamiento de un tema que se encuentra en pleno proceso de desarrollo, pero el autor ha conseguido incluir gran cantidad de información. Se recojen todos los progresos importantes hasta el otoño de 1959 y se han incluido algunas referatas a publicaciones aparecidas en 1960. W. G. OVEREND

PLEŠEK, J. y ZOBÁČOVÁ, A.: *Preparativní reakce v organicke chemii. V. Aldolisace a příbuzné reakce* (Reacciones en química orgánica preparatoria. Vol. v. Reacciones aldolisácicas y similares). 976 págs. Academia Checoeslovaca de Ciencias, Praga. 1960. 89 Kčs.

En su sentido más amplio, una reacción aldolisácica es aquella en que un α-hidrógeno reacciona con un carbonilo o un grupo similar. Hay decenas de millares de tales reacciones, 2700 de las cuales aparecen descritas en este grueso volumen. Comprende tres secciones principales: la primera se titula «Reacciones y condensaciones aldolisácicas» y trata, entre otras cosas, de reacciones aldolisácicas propias, tales como las autoadiciones, las condensaciones intramoleculares, y las reacciones aldehido-cetona. La segunda sección está dedicada a las reacciones de Claisen y tipos similares. La última trata de las reacciones de adición de Michaelis y es de especial utilidad por el capítulo sobre la cianoetilación. Todas esas síntesis se catalizan con bases; pero las reacciones ácido-catalizadas, tales como las de Mannich, aparecen incluidas al final de la primera sección.

Hay citadas 2664 referatas, incluyendo patentes, que cubren toda la literatura mundial, principalmente de 1950 a 1957, sin que hayamos notado parcialidad por los trabajos de ningún país. Añaden valor a este libro un índice de autores y otro de materias que cubren 35 páginas. Este tipo de libro, en el que cada página está cubierta de fórmulas orgánicas, es muy difícil de producir, y debemos, por consiguiente, felicitar a los editores y preparadores por su excelente labor.

M. K. SCHWITZER

DJERASSI, C.: *Optical Rotatory Dispersion.* XIII + 293 págs. McGraw-Hill Book Co. Inc., Nueva York; McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., Londres. 1960. 74s.

El fenómeno de la dispersión rotatoria óptica — es decir, el cambio de rotación óptica resultante del de longitud de onda — es ya conocido desde hace casi 150 años. Sin embargo, el uso de tal propiedad en la química orgánica estructural es muy reciente. Su aplicación, debida a la invención de nuevos instrumentos, ha sido exclusividad casi de una escuela, la del Profesor Carl Djerassi en la Stanford University de California.

Este es el primer libro sobre este tema en que el estudio se enfoca desde el punto de vista del químico orgánico y presenta un estudio muy completo y ameno de la materia, en un estilo de agradable personalidad. Como es justo, la mayor parte del libro está dedicada a los trabajos propios de Djerassi, principalmente en el campo de los esteroides, terpenos y compuestos alicíclicos afines. Los capítulos sobre los demás temas han sido redactados por especialistas en cada materia: instrumentación (A. N. James y B. Sjöberg), teoría (A. Moscowitz), polipéptidos y proteínas (E. R. Blout) y aminoácidos (J. A. Schellman).

Muchos especialistas de los productos naturales no necesitan que se les presente este libro. Sin embargo, la dispersión rotatoria óptica no es un instrumento especializado para algunos tipos de productos naturales; también puede servir en cualquier campo de la química (orgánica o inorgánica) en el que se estudien compuestos asimétricos. Actualmente se están realizando rápidos progresos tanto en la técnica misma como en sus aplicaciones. W. KLYNE

SMALES, A. A. y WAGER, L. R. (Compiladores): *Methods in Geochemistry.* VII + 464 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960. $13,50.

Este libro es una muy útil guía sobre los principios teóricos, técnicas y aplicaciones de los métodos analíticos usados para la recolección de datos geoquímicos y geocronológicos. Sin embargo, la amplitud del tratamiento que implica el título no existe, ya que este libro se limita a la geoquímica analítica y no incluye otros métodos, tales como los de la geoquímica experimental.

Las técnicas analíticas en él descritas incluyen ciertos refinamientos de los metodos húmedos químicos clásicos, así como un resumen de los métodos colorimétricos y fotométricos de llama usados en el análisis rápido de los silicatos, la espectrografía óptica, la radioespectrografía fluorescente, la espectrometría de masas (y el análisis de dilución isotópica), los métodos radioquímicos (con un capítulo aparte sobre el análisis de radiactivación) y la polarografía. Un importante capítulo trata al principio de las técnicas de recolección y preparación de substancias para su análisis; el capítulo final estudia los métodos químicos de separación por medio del intercambio de iones, la extracción de solventes y la cromatografía sobre papel.

Las colaboraciones (redactadas por doce autores) son, en general, claras y concisas. El libro no pretende ser completo; para ciertos detalles se hace continua referencia a una buena selección de trabajos recientes al final de cada capítulo. M. STONE

BIOLOGIA

Developing Cell Systems and their Control (Edición a cargo de Dorothea Rudnick). VI + 240 págs. The Ronald Press Co., Nueva York. 1960. $8.

El tema de los nueve trabajos que recoje este libro es la diferenciación biológica y los mecanismos que la controlan. Tardent y Bonner tratan de organismos enteros y estudian algunos de los problemas que plantean los hidroides regenerantes y los hongos de los limos en desarrollo. Moscona describe algunas investigaciones suyas en una de las ramas que más prometen en la moderna embriología: la reagregación de las células disociadas. Los mecanismos del control hormonal en plantas y animales son el tema de los trabajos de Phinney, West y Villee; Singer estudia la curiosa dependencia de la regeneración de los miembros de los anfibios respecto al crecimiento neuronal en la yema del miembro. Los tres trabajos últimos se ocupan de los mecanismos fundamentales en la biología molecular y celular, mecanismos

cuyas relaciones con los fenómenos de diferenciación son indudables pero desconocidas. Work estudia la síntesis de las proteínas y Stern describe algunos experimentos interesantes sobre la bioquímica del ciclo celular. El trabajo de Novikoff es un estimulante relato de sus investigaciones citoquímicas y excelente ejemplo de los buenos resultados que pueden obtenerse en una rama que a menudo se considera pedestre. Pero tiene apenas relación directa con el tema principal del libro, lo que sirve para indicar la más grave crítica que se puede hacer de este simposio. La diferenciación es un tema muy amplio, amorfo y difícil y hubiera sido mucho mejor limitarse a nueve trabajos para concentrarse en un sólo nivel de organización y no esforzarse por salvar la distancia que existe entre animales y moléculas.

J. M. MITCHISON

BIOQUIMICA

Advances in Enzymology, Vol. XXII (dirigido por F. F. Nord). v+567 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960. £5 6s.

Todos los enzimólogos y gran número de bioquímicos esperan siempre con interés la publicación del volumen anual de esta colección. El último publicado tiene un rico y variado contenido que no desilusionará a nadie.

Este Volumen XXII cubre un campo muy extenso, desde la enzimología pura (sitio activo y acción enzimática, síntesis e hidrólisis de ésteres sulfatados, enlaces de coenzimas, y cromatografía enzimática) hasta el metabolismo químico y la genética (biosíntesis del colesterol, bioquímica de los compuestos de sulfonio, síntesis inducida de las proteínas, y diferencias genéticamente controladas en la actividad enzimática). También se encuentra un muy interesante artículo sobre la síntesis de coenzimas de nucleótidos, redactado por dos químicos orgánicos.

Los autores se dirijen a un público general de bioquímicos, pero consiguen al mismo tiempo interesar al especialista. Como es natural, el equilibrio entre estos dos elementos dispares varía de capítulo a capítulo.

H. GUTFREUND

ZOOLOGIA

OSMAN HILL, W. C.: *Primates, Comparative Anatomy and Taxonomy*, Vol. IV, *Cebidae*, Parte A. XXII+523 págs. Edinburgh University Press, Edimburgo. 1960. £9 9s.

La obra enciclopédica del Dr. Osman Hill sobre la anatomía comparada de los primates alcanza ahora su cuarto Volumen con esta publicación de la Parte A de su monografía sobre *Cebidae*. En ella trata de cuatro subfamilias de los monos del Nuevo Mundo. Como en volúmenes anteriores se preocupa principalmente del análisis de las características anatómicas internas y externas de los varios géneros y especies, pero también incluye en su estudio datos sobre el *habitat*, régimen alimenticio y comportamiento. No puede menos de impresionarnos la asiduidad e inmenso esfuerzo empleados por el autor para recoger en la inmensa literatura sobre estos temas toda la información que presenta en su libro. El texto va acompañado de numerosas ilustraciones de notable calidad técnica; el estilo de su escritura es preciso y agudo. En una obra de consulta de este tipo, que se esfuerza por ser completa, no se puede evitar que en algunos casos los datos recogidos se basen sobre observaciones de especímenes únicos, así que no es posible indicar el grado de variación de las características anatómicas de las especies individuales. En volúmenes sucesivos el autor irá completando esta enciclopedia con estudios de las restantes subfamilias de *Cebidae* y de los monos y simios antropoideos del Viejo Mundo. Así completada, esta obra será el libro de consulta más moderno sobre los primates y, por lo tanto, esencial no sólo para los primatólogos sino también para los zoólogos en general.

SIR WILFRID LE GROS CLARK

HISTORIA DE LA TECNOLOGIA

Transactions of the Newcomen Society for the Study of the History of Engineering and Technology, Vol. XXX (1955–56 y 1956–57). 281 págs+62 planchas. The Newcomen Society, Londres. 1960. 50s.

Como sus predecesores, el volumen XXX de las actas de estos debates contiene tal riqueza y variedad de memorias sobre la historia de la tecnología que no nos es siquiera posible dar aquí una lista. Nos limitaremos pues a comentar aquéllas que tratan de los temas de más actualidad.

Los recientes estudios del Profesor Derek J. de Solla Price sobre el mecanismo antikytérico dan especial interés a la memoria del Dr. von Bertele sobre el «Origen de los engranajes diferenciales y su relación con los relojes de ecuación», ya que aclara mucho la confusión entre un computador astrónomico mecánico como parte de un reloj y el mecanismo cronométrico mismo, por lo menos en lo que a los engranajes necesarios se refiere. ¿No es quizás ya hora de que alguien prepare una buena historia general de los engranajes?

También tenemos que agradecer a A. Stowers su disertación presidencial, a la que acompañan dibujos y dimensiones gracias a los cuales se puede realizar un análisis más lógicamente razonado de los artefactos romanos de Chollerford Bridge, Northumberland.

Es lástima que el retraso en la publicación de estos trabajos impida un estudio más reciente y detallado de su excelente contenido.

R. S. WOODBURY

BARKER, T. C.: *Pilkington Brothers and the Glass Industry*. 296 págs. George Allen and Unwin Ltd., Londres. 1960. 40s.

He aquí que una firma notable ha encontrado el historiador que merece. En este libro se describen las vicisitudes del desarrollo de una empresa industrial que en 1826 comenzó con medios muy simples a fabricar vidrio y que hoy controla su manufactura en gran escala en la Gran Bretaña. La casa Pilkington continúa siendo hoy una empresa familiar; pero, en este estudio, el respeto a la familia no ha oscurecido lo que en realidad eran las relaciones laborales en la Inglaterra de la época victoriana. Así leemos que, después de una huelga fracasada, «los salarios eran todo lo bajos posible», con contratos reducidos para los operarios especializados y multas de 10 chelines para quien faltara un solo día sin causa justificada.

En cada sucesiva generación esta empresa ha tenido que hacer frente a nuevos problemas técnicos. El último de ellos: el establecimiento de un proceso especial para la producción continua de lámina de vidrio entrañaba dificultades de «equilibrio físico y químico entre el vidrio líquido, el metal líquido y la atmósfera, todos a altas temperaturas». Fueron necesarios ocho años, tres nuevas plantas y 4 000 000 de libras esterlinas para dar con la perfecta solución.

T. K. DERRY

Revistas resumidas de libros

(Estas revistas tienen carácter descriptivo más bien que crítico y sirven para dar una indicación general del contenido y naturaleza de las obras tratadas.)

BALLENTYNE, D. W. G. y WALKER, L. E. Q.: *A Dictionary of Named Effects and Laws in Chemistry, Physics and Mathematics* (2ª edición). v + 234 págs. Chapman and Hall Ltd., Londres. 1961. 30s.

Este libro recoje los efectos y leyes que han recibido el nombre de sus descubridores. La segunda edición contiene más de 150 definiciones nuevas y una nueva redacción del apéndice sobre las unidades.

AITKEN, M. J.: *Physics and Archaeology*. x + 181 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1961. 43s.

El autor de este libro procura describir algunas de las distintas maneras en que la física sirve de auxiliar en los estudios arqueológicos. Está destinado tanto al lector con intereses científicos generales como al estudiante de arqueometría (medición de los materiales arqueológicos). Los capítulos están ordenados de tal modo que se puede estudiar una sola técnica — y aún una aplicación particular de la misma — sin necesidad de referirse a otras. Las técnicas estudiadas incluyen la locación magnética, la topografía de resistividad y la datación radiocarbónica y magnética.

Russian Journal of Physical Chemistry, No. 7, 1959. Dirigido por Ya. I. Gerasimov. 107 págs. The Chemical Society, Londres. Subscripción anual: £30.

Primer número de la traducción inglesa de Журнал физической Химии. Estas traducciones se publicarán mensualmente bajo la dirección de R. P. Bell y aparecerán aproximadamente unos tres meses después de la salida del número en ruso. Los artículos de éste incluyen: «Propiedades termodinámicas de los compuestos de sodio en estado sólido», por P. G. Maslov; «Influencia mutua de los substituyentes en los derivados bencénicos *p*-disubstituidos», por P. P. Shorygin; y «Cinética de la disociación térmica de moléculas diatómicas», por E. V. Stupochenko y A. I. Osipov.

PEACOCKE, T. A. H.: *Small Scale Experimental Chemistry*. XII + 164 págs. Longmans, Green & Co. Ltd., Londres. 1960. 8s. 6d.

Este libro se propone suministrar una serie de experimentos que sirvan para enseñar — siguiendo el método heurístico — los principios del análisis inorgánico cualitativo, y contiene una serie de preparaciones inorgánicas en pequeña escala, tales como las que se exigen para la obtención en Gran Bretaña del Certificado General de Enseñanza. Para ello los autores se han apartado de ciertos métodos tradicionales. Así, en general, las ecuaciones se escriben en forma iónica y se usan las versiones modernas de las fórmulas de oxianiones tales como el zincato y el aluminato. Se subrayan sobre todo los experimentos en escala semimicro, y en un apéndice se describen los métodos de construcción de algunos aparatos necesarios.

ORGEL, L. E.: *An Introduction to Transition-Metal Chemistry: Ligand-Field Theory*. 180 págs. Methuen & Co. Ltd., Londres; John Wiley and Sons Inc., Nueva York. 1960. 25s.

El autor se propone que este libro sea usado por los estudiantes de química inorgánica y otros lectores que busquen un estudio general de la teoría del campo de ligandos; por lo tanto el libro es corto y evita las matemáticas. Los capítulos describen, entre otros temas, los orbitales y energías, la estereoquímica, los mecanismos y velocidades de reacción, y los complejos formados por los hidrocarburos insaturados.

WHELAND, G. W.: *Advanced Organic Chemistry* (3ª edición). XI + 871 págs. John Wiley & Sons Ltd., Londres. 1960. £7.

Este texto se propone presentar en considerable detalle la teoría estructural en su sentido más amplio, omitiendo deliberadamente todo estudio de la química orgánica descriptiva. En esta edición, el autor continúa subrayando la teoría de la resonancia, y ha añadido temas tales como la resonancia electrónica y la magnético-nuclear, el análisis conformacional y las relaciones rho-sigmáticas de Hammett. También ha ampliado el estudio de los mecanismos de reacción e indicado el valor de los datos cinéticos en este enfoque.

GOWAN, J. E. y WHEELER, T. S.: *Name Index of Organic Reactions* (2ª edición). III + 293 págs. Longmans, Green & Co. Ltd., Londres. 1960. 50s.

Como hay gran número de reacciones orgánicas que reciben el nombre de su descubridor, este libro se propone combatir la oscuridad resultante de tal costumbre. La segunda edición es mucho más extensa que la primera y procura ser completa; también incluye nuevas fórmulas y un índice de los tipos de reacción.

PINDER, A. R.: *The Chemistry of the Terpenes*. VII + 223 págs. Chapman and Hall Ltd., Londres. 1960. 50s.

Este libro se propone servir de puente entre los textos generales de química y los libros más completos sobre los terpenos. Se subrayan en él las reacciones que intervienen en la degradación y la síntesis, las transformaciones químicas que se producen en la química de los terpenos, y algunos descubrimientos recientes en estereoquímica y biosíntesis. Los temas tratados incluyen los diversos monoterpenos, diterpenos, triterpenos, tetraterpenos, la goma, y la biogénesis de los terpenos.

SHEPHERD, H. R.: *Aerosols: Science and Technology*. XIV + 548 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1961. £8 9s.

Esencialmente este libro es una reseña general de las prácticas actuales en aerosoles. Algunos de sus capítulos tratan de sus aspectos teóricos y prácticos, de los recipientes, válvulas y propelentes usados. Otros estudian las substancias que hoy se preparan en forma de aerosol, tales como productos cosméticos, farmacéuticos, alimenticios, insecticidas y pinturas.

Biographical Memoirs of Fellows of The Royal Society, Vol. VI. 295 págs. The Royal Society, Londres. 1960. 30s.

Estas memorias son obra de varios autores y presentan una biografía y un estudio valorativo de la obra de cada uno. El presente volumen incluye memorias de A. C. G. Egerton por D. M. Newitt, I. M. Heilbron por A. H. Cook, Max von Laue por P. P. Ewald, y F. A. Paneth por H. J. Emeléus.

Notas sobre los colaboradores

H. BONDI

Nació en Viena en 1919 y estudió en el *Realgymnasium* de dicha ciudad y en el *Trinity College* de Cambridge. En 1945 fue nombrado Profesor Ayudante en esa institución y más tarde Profesor de matemáticas en la Universidad de Cambridge. Ha colaborado con T. Gold, F. Hoyle y R. A. Lyttleton en el estudio de problemas de astronomía y cosmología. Desde 1954 es Catedrático de matemática aplicada en el *King's College* de la Universidad de Londres.

D. J. K. O'CONNELL

Nació en Inglaterra y estudió en Irlanda. Trabajó en el Observatorio del *Harvard College* desde 1931 a 1933; de allí pasó al del *Riverview College*, Australia, del que fue Director desde 1938 a 1952, fecha en que fue nombrado Director del Observatorio Vaticano en Castel Gandolfo. Sus principales investigaciones han tratado de las estrellas variables. Desde 1955 es Presidente de la Comisión de Eclipses Binarios de la Unión Astronómica Internacional.

CARL DJERASSI

Nació en 1923 y estudió en el *Kenyon College* y en la Universidad de Wisconsin. Ha trabajado como investigador químico (1942–43, 1945–49) en la Compañía Ciba de Productos Farmacéuticos, Summit, Nueva Jersey, y más tarde como Director Asociado de Investigación y Vicepresidente de Investigación (1957–60) en Syntex S.A., México D.F. Ha sido catedrático de química orgánica en la Universidad del Estado de Wayne, Detroit, desde 1952 a 1959; desde esa fecha es Catedrático de la Universidad Stanford. Es Miembro de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos y ha recibido el Premio de Química Pura (1958) de la *American Chemical Society*, así como la Medalla Baekeland (1959) y la Medalla Fritzsche (1960). También ha recibido títulos *honoris causa* del *Kenyon College* y de la Universidad Nacional de México. Es autor de más de 300 artículos sobre la química de los productos naturales (antibióticos, alcaloides, esteroides y terpenoides) y sobre las aplicaciones de las medidas físicas (especialmente de la dispersión rotatoria óptica) a los problemas de la química orgánica.

J. L. SIRLIN

Nació en Buenos Aires en 1926 y allí obtuvo su doctorado en ciencias naturales. En 1953 obtuvo una beca del *British Council* y trabajó en el Instituto de Genética Animal de la Universidad de Edimburgo. Después de colaborar con la *British Empire Cancer Campaign* ingresó en 1960 en el personal de la Sección de Genética Animal del *Agricultural Research Council*. Ha realizado investigaciones sobre cuestiones de genética, embriología y reproducción animal y en la actualidad se interesa en la citología bioquímica de la síntesis de las proteínas.

I. D. RATTEE

Nació en 1926 y estudió en el *Royal College of Science* de Londres. Ha trabajado con *Imperial Chemical Industries Ltd.* en su División de Colorantes, Mánchester, desde 1945. Desde ese año hasta 1950 se ocupó de los problemas relacionados con la tinción de la lana y publicó varios trabajos al mismo tiempo que resolvía problemas técnicos planteados por los industriales tintoreros de lana. En 1951 comenzó sus investigaciones sobre los tintes reactivos para la lana, proyecto de largo alcance, y en 1953 inició su colaboración con el Dr. W. E. Stephen, de la que resultaron los colorantes «Procion». Por estos trabajos ambos colaboradores recibieron la Medalla de Oro de la *Society of Dyers and Colourists* en 1960. Desde 1953 trabaja sobre los colorantes reactivos para las fibras celulósicas, tanto desde el punto de vista investigacional como del técnico; ha participado en la preparación de numerosas patentes.

J. R. PARTINGTON

Nació en Bolton, Lancashire, y estudió en las Universidades de Mánchester y de Berlín. Fue Profesor Ayudante en la Universidad de Mánchester y en 1919 fue nombrado el primer Catedrático universitario de Química del *East London College*, más tarde *Queen Mary College*, de la Universidad de Londres; se jubiló en 1951. Ha sido Vicepresidente de la *Faraday Society;* Presidente de la *British Society for the History of Science* y es Miembro Efectivo de la *Académie Internationale d'Histoire des Sciences*. Es autor de trabajos sobre química inorgánica y física, sobre la historia de la química, y de varios libros. Su ultima obra es *A History of Greek Fire and Gunpowder*.